

Treball de Fi de Grau

## **Grau en Enginyeria en Tecnologies Industrials**

# **Cap a la producció a gran escala de mòduls fotovoltaics orgànics semitransparents per a la seva integració en façanes d'edificis**

## **MEMÒRIA**

**Autor:** Clara Aranda Carballo  
**Director:** Rafael Lamaison Urioste  
**Convocatòria:** Gener 2017



Escola Tècnica Superior  
d'Enginyeria Industrial de Barcelona



## Resum

L'energia solar fotovoltaica és una de les principals fonts renovables d'electricitat gràcies a la gran quantitat de recurs solar de què disposa la terra. Actualment, les tecnologies fotovoltaiques de silici cristal·lí dominen sobre la resta, amb una presència al mercat del 30% per als mòduls fotovoltaics de silici monocristal·lí i 60% per als de silici policristal·lí, però des de fa 30 anys noves generacions de fotovoltaiques han anat sorgint per fer front als principals desavantatges d'aquesta i, alhora, aportar nous atributs per a estendre el seu ús a altres aplicacions.

La fotovoltaica orgànica és una tecnologia fotovoltaica de tercera generació particularment prometedora en aplicacions d'integració de mòduls fotovoltaics en elements constructius d'edificis, o BIPV (*Building Integrated Photovoltaics*), gràcies a les seves propietats de flexibilitat i transparència i el seu econòmic procés productiu mitjançant tècniques contínues de recobriment i impressió d'alt rendiment, baix consum energètic i amb capacitat de produir grans àrees. Amb aquests prospectes, s'han produït uns mòduls fotovoltaics orgànics semitransparents amb una capa activa basada en la heterojunció dels polímers P3HT i PCBM, dos elèctrodes transparents i un cristall fotònic per a maximitzar l'absorció de la irradiació solar.

El treball inclou una anàlisi del procés productiu, del comportament elèctric i de la transparència dels mòduls. Alhora, s'efecuta l'extrapolació dels resultats a una futura producció a gran escala per determinar la viabilitat d'aquests mòduls en qüestió de costos, rendibilitat i efectes sobre el medi ambient. Tots aquests aspectes de la fotovoltaica orgànica son comparats amb la fotovoltaica convencional de silici cristal·lí. L'objectiu és que, en un futur no llunyà, la fotovoltaica orgànica pugui competir-hi en quota de mercat mitjançant la seva implantació i fidelització en una part d'aquest, potencialment molt extensa en utilitat i àrea, com són les façanes i altres elements d'edificis, en què els mòduls de silici cristal·lí no tenen cabuda per les seves propietats.

Els principals reptes d'aquesta innovadora alternativa a la fotovoltaica convencional de silici cristal·lí són una millora en l'eficiència i, sobretot, en l'estabilitat, ja que la degradació és una gran contraindicació per a la seva integració en edificis.



## Sumari

<b>RESUM</b>	<b>1</b>
<b>SUMARI</b>	<b>3</b>
<b>1. INTRODUCCIÓ</b>	<b>5</b>
<b>2. L'ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA</b>	<b>7</b>
2.1. Classificació de les cèl·lules fotovoltaïques.....	7
2.2. L'efecte fotovoltaic.....	8
2.2.1. En materials inorgànics.....	8
2.2.2. En materials orgànics .....	9
2.3. Caracterització de les cèl·lules fotovoltaïques.....	11
2.4. Efecte de les condicions de contorn sobre el rendiment de la cèl·lula.....	13
2.4.1. Efecte de la irradiància .....	13
2.4.2. Efecte de la temperatura .....	14
2.4.3. Efecte de les resistències.....	15
2.4.4. Efecte <i>light-soaking</i> .....	17
<b>3. ESTRUCTURA DE LES CÈL·LULES SOLARS</b>	<b>19</b>
3.1. Cèl·lules fotovoltaïques de silici.....	19
3.2. Cèl·lules fotovoltaïques orgàniques .....	22
3.2.1. Elèctrode inferior .....	22
3.2.2. Capa activa.....	23
3.2.3. Capes transportadores de portadors de càrrega.....	24
3.2.4. Elèctrode superior.....	25
3.2.5. Tipus d'estructura.....	25
3.2.6. Cristall fotònic.....	26
<b>4. PRODUCCIÓ DELS MÒDULS FOTOVOLTAICS</b>	<b>27</b>
4.1. Estat de l'art de la producció de mòduls fotovoltaics de pel·lícula fina .....	27
4.1.1. <i>Spincoating</i> (Recobriments per centrifugació) .....	27
4.1.2. <i>Doctor blading</i> .....	28
4.1.3. Impressió <i>inkjet</i> .....	29
4.1.4. <i>Slot die</i> (Impressió per boca de ranura).....	29
4.1.5. <i>Screen printing</i> (Impressió per pantalla rotativa) .....	30
4.2. Fabricació dels mòduls fotovoltaics inorgànics de silici cristal·lí.....	31
4.3. Producció dels mòduls fotovoltaics orgànics semitransparents.....	35

<b>5. AVALUACIÓ COMPARATIVA DELS MÒDULS FOTOVOLTAICS ORGÀNICS SEMITRASPARENTS</b>	<b>39</b>
5.1. Condicions del <i>benchmarking</i> .....	39
5.2. Caracterització dels mòduls.....	40
5.2.1. Transmissió espectral.....	40
5.2.2. Característiques elèctriques dels mòduls.....	42
5.3. Període de <i>benchmarking</i> .....	47
5.3.1. Transmissió espectral.....	47
5.3.2. Característiques elèctriques dels mòduls.....	53
5.4. Resum dels resultats .....	57
<b>6. ANÀLISI DE COSTOS</b>	<b>59</b>
6.1. Cost de materials.....	59
6.2. Cost de la producció dels mòduls .....	61
<b>7. TEMPS DE RETORN ENERGÈTIC I EMISSIONS DE GASOS D'EFECTE HIVERNACLE</b>	<b>65</b>
7.1. Temps de retorn energètic (EPBT) .....	66
7.2. Emissions de gasos d'efecte hivernacle.....	69
<b>8. PRESSUPOST</b>	<b>73</b>
<b>9. IMPACTE AMBIENTAL</b>	<b>75</b>
<b>CONCLUSIONS</b>	<b>77</b>
Futures línies de treball .....	78
<b>AGRAÏMENTS</b>	<b>81</b>
<b>BIBLIOGRAFIA</b>	<b>83</b>
Referències bibliogràfiques .....	83
Bibliografia complementària.....	84

## 1. Introducció

“Més energia provinent del sol arriba a la terra en una hora que la consumida per les persones en un any”. Aquesta frase posa de manifest l'enorme quantitat de recurs energètic solar de què disposem al nostre planeta, molta més que de qualsevol altre font d'energia renovable o combustible fòssil. De manera quantificada, rebem més de  $10^5$  TW de radiació solar, de la qual fins a 600 TW seria tècnicament aprofitable. Això s'ha de tenir en compte en la situació en què ens trobem; els requeriments energètics per persona augmenten cada dia, igual que el consum de petroli, gas natural i carbó que ens proporcionen la majoria de l'energia que utilitzem tot i ser recursos limitats i causar, en el seu ús per a la producció d'energia, greus problemes mediambientals associats amb l'emissió de diòxid de carboni i altres gasos d'efecte hivernacle que contribueixen a l'escalfament global.

L'aprofitament d'energia solar pot ser a través de la seva conversió en calor (energia solar tèrmica), en electricitat (energia solar fotovoltaica) o en substàncies químiques (combustibles solars). Tot i que aquesta darrera està encara en fase de recerca bàsica, les altres dues ja es troben implementades, en major o menor mesura, arreu del món. L'energia solar tèrmica compta amb instal·lacions que van de bombes de calor domèstiques a centrals elèctriques de l'ordre de MW. D'altra banda, la fotovoltaica es troba en sistemes fotovoltaics residencials, que normalment no excedeixen els 20 kW, edificis de gran escala d'un màxim d'1 MW, parcs fotovoltaics de més de 1 MW i altres aplicacions fora de la xarxa elèctrica de diverses capacitats.

El focus d'aquest treball és l'estudi del desenvolupament de l'energia fotovoltaica orgànica semitransparent per a la seva integració en les façanes d'edificis, de manera que la gran superfície de vidre dels edificis es pugui convertir en panells fotovoltaics rendibles amb una transparència homogènia que permeti el pas de llum visible i que, a la vegada, generin una gran quantitat d'energia. Aquesta finalitat fa que els mòduls fotovoltaics no només siguin considerats dispositius generadors d'energia elèctrica, sinó també elements de l'edifici, motiu pel qual també han de complir els requeriments dels elements constructius, com ara longevitat i seguretat.

Per què mòduls fotovoltaics orgànics?

L'energia fotovoltaica orgànica és la generació més jove de cèl·lules fotovoltaiques i es basa en l'ús de materials semiconductors orgànics en forma de polímers o dendrímers per a convertir energia solar en electricitat mitjançant l'efecte fotovoltaic. Els seus principals atributs són:

- Fabricació a baixes temperatures a partir de fase de vapor o dissolucions.
- Transparència, flexibilitat i lleugeresa.

- Materials fàcilment processables i amb capacitat per formar dispositius de grans àrees per un baix cost.

Tot i que les plaques fotovoltaïques de silici cristal·lí són una tecnologia madura i amb eficiències elevades, els avantatges que pot presentar la fotovoltaïca orgànica són prometedors, especialment per a aplicacions de BIPV (*Building Integrated Photovoltaics* o Fotovoltaïca integrada en edificis).

L'ús de plaques fotovoltaïques per a la seva integració en edificis és una de les aplicacions més atractives i potencialment rendibles del mercat, ja que ofereix una manera elegant d'instal·lar la quantitat adequada de sistemes fotovoltaïcs sense haver d'usar espai addicional. Per a aquest propòsit, les tecnologies fotovoltaïques de pel·lícula fina i grans àrees són les més apropiades per les seves bones capacitats intrínseques de bona transparència i flexibilitat envers de les que ofereix el silici cristal·lí. L'ús d'aquestes tecnologies s'estén als elements que conformen l'envoltant d'un edifici, com ara teulades, façanes, finestres i tendals.

Per a la realització d'aquest treball, he pogut comptar amb la informació i resultats dels mòduls fotovoltaïcs orgànics semitransparents desenvolupats en un projecte que es troba dins del 7è Programa Marc de la Comissió Europea i en què han participat diversos centres de recerca i empreses europeus. Aquests mòduls seran comparats, d'una manera pràctica, amb dos altres tecnologies fotovoltaïques orgàniques més madures mitjançant una avaluació comparativa, els resultats de la qual podran comparar-se alhora amb la fotovoltaïca inorgànica convencional (silici cristal·lí) a partir de dades obtingudes de la literatura. Amb això, es pretén realitzar un estat del art, tant dels nous mòduls com de la fotovoltaïca orgànica en general, per tal de determinar els punts forts d'aquesta tecnologia així com aquells aspectes que encara s'han de millorar per a una futura aplicació a gran escala en l'àmbit de la fotovoltaïca integrada en edificis.

## 2. L'energia solar fotovoltaica

### 2.1. Classificació de les cèl·lules fotovoltaiques

Les cèl·lules fotovoltaiques estan formades per materials semiconductors que poden convertir la radiació incident en corrent elèctric. Depèn de la seva estructura, se solen classificar en dos tipus:

- **Silici cristal·lí:** és el material semiconductor dominant usat en la tecnologia fotovoltaica per a la producció de cèl·lules solars. Presenten les eficiències més altes del mercat, però el seu cost de producció és elevat degut a la poca disponibilitat del silici. Dins d'aquesta categoria de plaques fotovoltaiques es troben les de silici monocristal·lí (mono c-Si) i les de silici policristal·lí (multi c-Si).
- **De pel·lícula fina:** la cèl·lula fotovoltaica es produeix mitjançant la deposició d'una o més capes fines de material fotovoltaic a sobre d'un substrat (vidre, plàstic o metall). Generalment, el seu cost de producció és menor que les de silici cristal·lí, però també presenten eficiències més baixes. Alguns exemples són les cèl·lules fotovoltaiques de silici amorf (a-Si), tel·lurur de cadmi (CdTe), coure indi gal·li i seleni (CIGS), les sensibilitzades per colorant (cèl·lules Grätzel) i les orgàniques (OPV).

Alternativament, també es pot establir una classificació segons generacions:

- **Primera generació:** les de silici cristal·lí. Són la tecnologia més madura i la que actualment domina el mercat i ofereix unes eficiències més altes (entre 15% i 20%) i una bona estabilitat. D'altra banda, són rígides i el procés de producció requereix molta energia i té, conseqüentment, un alt cost.
- **Segona generació:** les de silici amorf, CIGS i tel·lurur de cadmi, amb una eficiència típicament entre el 10 i el 15%. Ofereixen certs avantatges respecte de la primera generació, com ara un cost de producció més baix pel fet d'usar menys material (són de tipus pel·lícula fina) i la possibilitat de fer-les flexibles en major o menor grau. No obstant això, els seus costos segueixen sent alts pel tipus de procés de producció d'alta energia (al buit, amb altes temperatures) i l'escassetat dels materials usats.
- **Tercera generació:** són aquelles tecnologies emergents que no es basen en la unió p-n convencional, entre elles les plaques fotovoltaiques orgàniques (OPV) que utilitzen petites molècules o polímers com a material semiconductor. Presenten



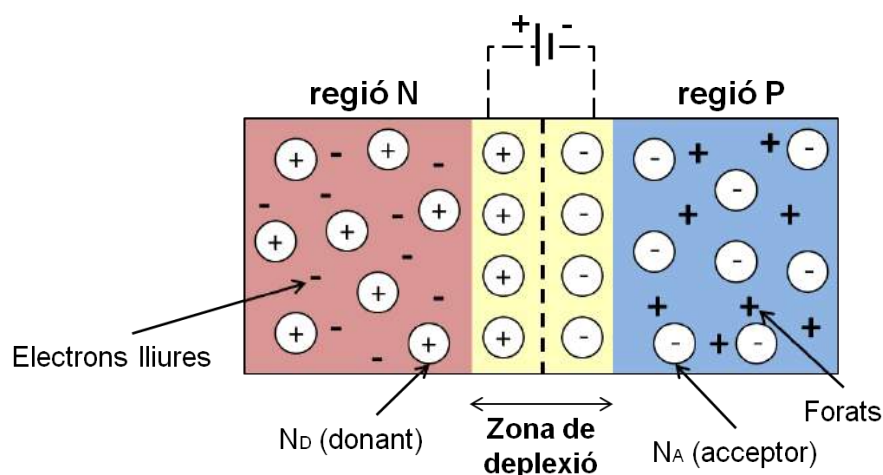
avantatges respecte de les generacions anteriors, sobretot en termes de cost, degut a un procés de producció a gran escala senzill, ràpid i econòmic i l'ús de materials que es troben fàcilment disponibles i que tenen uns preus potencialment baixos. Tot i que la seva eficiència és baixa i plantegen problemes de degradació, tenen un gran potencial que fa que encara s'estigui fent recerca per assolir millors valors de rendiment i estabilitat. Les cèl·lules Grätzel i les multi-unió també pertanyen a aquesta generació.

## 2.2. L'efecte fotovoltaic

### 2.2.1. En materials inorgànics

El procés de generació de corrent elèctric a partir de la llum incident en els dispositius fotovoltaics inorgànics ve donat per la formació d'un díode amb la unió de dues regions de semiconductor, una de tipus n i l'altra de tipus p. Un semiconductor de tipus n està dopat amb àtoms que contenen un electró més a la capa de valència, mentre que un de tipus p ho està amb àtoms d'un electró menys a la capa de valència (únicament els electrons de la capa de valència participen en el corrent elèctric). Això fa que el tipus n tingui facilitat per cedir electrons, que seran acceptats pel tipus p. Aquest fenomen dóna lloc a la zona de depleció, on hi ha un camp elèctric.

Els semiconductors tenen una banda de valència i una banda de conducció separades per un *band gap* o banda prohibida de valors energètics que van des d'uns pocs eV a valors per sota de 4 eV. Quan un fotó incideix sobre un electró de material semiconductor amb energia suficient (major que la del *band gap*), l'electró s'excita de la banda de valència a la banda de conducció. A la unió p-n, l'electró i el forat resultant són accelerats en sentits contraris pel camp elèctric (els electrons cap a la regió N i els forats cap a la P) resultant en un potencial elèctric i un corrent que generen potència.



**Figura 2.1:** Esquema de l'efecte fotovoltaic en materials inorgànics.

La probabilitat de col·lecció descriu la probabilitat que un portador de corrent generat per l'absorció de llum sigui recol·lectat per la unió p-n i, per tant, pugui contribuir a la generació de corrent. Aquesta probabilitat depèn de la distància que el portador ha de recórrer comparada amb la longitud de difusió (distància mitjana que un portador recorre des de la seva generació fins que es recombina) i de les propietats de la superfície. Quan els portadors es generen a la zona de depleció, la probabilitat de col·lecció és 1 ja que la parella electró-forat és ràpidament separada pel camp elèctric. Fora de la unió, la probabilitat es va reduint i a més d'una longitud de difusió aquesta és molt baixa. D'altra banda, si el portador es genera a prop d'una regió com una superfície amb alta recombinació, la parella electró-forat es recombina. El fenomen de recombinació d'un portador fa que la parella electró-forat generada per la llum incident es perdi i que, per tant, no pugui contribuir a la generació de corrent o potència.

Els materials semiconductors fortament dopats presenten una major recombinació i, per tant, longituds de difusió més curtes. D'altra banda, aquells materials amb longituds de difusió més llargues també exhibeixen majors temps de vida, que són el temps mitjà que un portador minoritari pot estar en estat excitat després de la generació de la parella electró-forat abans de recombinar-se. El concepte de temps de vida no té a veure amb l'estabilitat del material però sí que es un indicador de l'eficiència de la cèl·lula solar (a més temps de vida, l'eficiència és normalment major) i, per tant, s'ha de tenir en compte a l'hora de triar els materials.

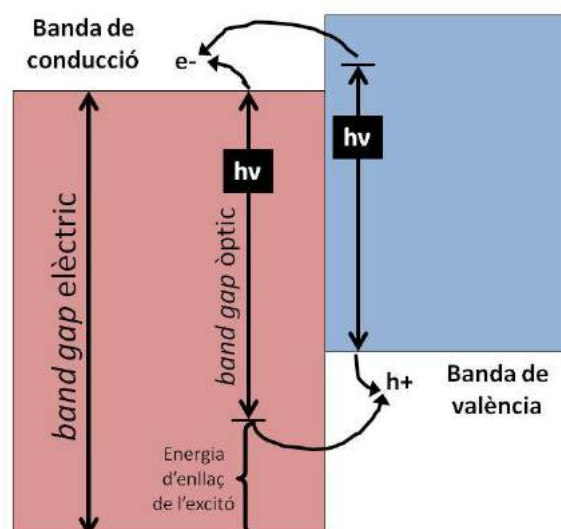
### 2.2.2. En materials orgànics

Tot i que el comportament extern és el mateix, el mecanisme de generació de corrent i voltatge de les cèl·lules fotovoltaïques orgàniques es diferent al de les inorgàniques. Com que els materials usats no són cristal·lins, tampoc tenen les bandes definides d'energia esmentades anteriorment ni tampoc un camp elèctric que mogui els electrons i els separi dels forats. Per aquest motiu, les fotovoltaïques orgàniques consisteixen en dos materials, un preferit pels electrons i l'altre, pels forats, que s'encarreguen de separar els dos tipus de portadors de càrrega abans que es puguin recombinar. Amb tot això, els dos materials semiconductors de la capa activa han de dur a terme tres tasques: (i) absorció de llum en l'espectre visible, (ii) captació dels electrons (l'acceptor) i (iii) captació dels forats (donador). Habitualment, el primer i un dels altres dos rols són suportats per un sol material [1].

L'absorció d'un fotó en materials orgànics porta a la formació d'un excitó, és a dir, una parella electró-forat unida. La seva energia d'enllaç és de l'ordre de 500 meV o major, considerablement més gran que la dels semiconductors inorgànics, d'uns pocs meV. Per tant, l'absorció òptica en materials orgànics no dona lloc a portadors de càrrega lliures

que poden generar corrent elèctric fàcilment, sinó que els excitons en primer lloc s'han de dissociar.

Els excitons generats a més d'una longitud de difusió de la heterojunció dels materials ( $\sim 10^{-6} - 10^{-9}$  m) no contribueixen a res ja que es recombinaran abans de poder arribar-se a dissociar. Els generats suficientment a prop de la interfície o bé es dissociaran formant portadors de càrrega o seran reflectits a la superfície i es recombinaran. Per a que els excitons es dissociïn en portadors de càrrega, l'*offset* entre les bandes d'energia dels dos materials ha de ser més gran que l'energia d'enllaç de l'excitó (veure figura 2.2). Com que el *band gap* òptic (energia necessària per formar un excitó) és menor que el *band gap* elèctric (energia necessària per crear una parella electró-forat) degut a la baixa constant dielèctrica i les debils forces intermoleculars en els semiconductors orgànics comparades amb els inorgànics, l'excitó no tindrà prou energia per dissociar-se excepte a la interfície entre els dos materials on hi ha el desplaçament entre les bandes d'energia o *offset*.



**Figura 2.2:** Esquema de l'efecte fotovoltaic en materials orgànics.

Un cop es formen els portadors de càrrega han de ser transportats des de l'heterojunció als elèctrodes. Perquè les càrregues no es perdin abans de ser captades pels elèctrodes, els materials semiconductors usats també han de poder conduir càrregues eficientment (temps de vida llargs). Per tant, l'elecció dels materials és molt important per assegurar que el camí als elèctrodes sigui energèticament favorable, alhora que es retingui tensió a la sortida.

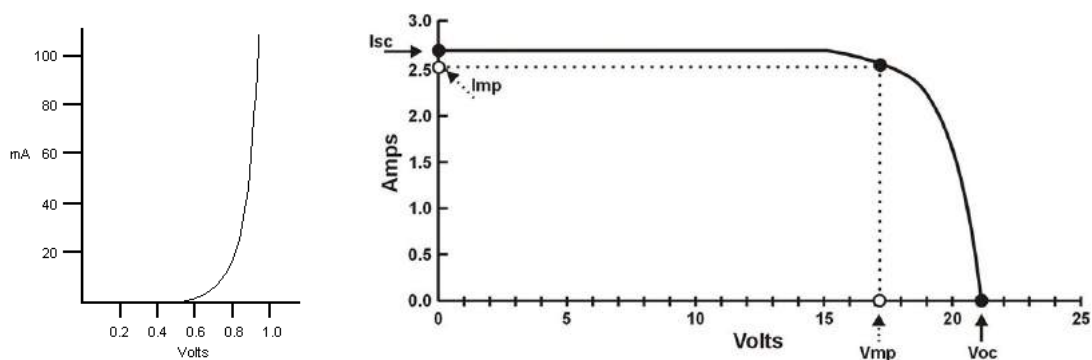
### 2.3. Caracterització de les cèl·lules fotovoltaïques

El comportament de les cèl·lules fotovoltaïques normalment es representa amb la corba I-V, que és un gràfic que mostra les possibles combinacions de corrent i voltatge de sortida d'un dispositiu fotovoltaic. Aquesta avaluació es realitza quan les cèl·lules s'acaben de processar, sota condicions de prova estàndard, és a dir, sota una irradiació de  $1000 \text{ W/m}^2$ , una temperatura de cèl·lula de  $25^\circ\text{C}$  i llum incident perpendicular a la cèl·lula. És important destacar que els mòduls fotovoltaics es caracteritzen de la mateixa manera que les cèl·lules, amb l'única diferència que els resultats obtinguts estan escalats, és a dir, són més elevats. Això és degut a que els mòduls són el resultat de la interconnexió de diverses cèl·lules entre si per a assolir uns valors de potència elèctrica que puguin satisfer les necessitats reals d'energia.

Les cèl·lules fotovoltaïques sense llum incident es comporten com díodes de polarització directa, que operen al quadrant superior dret (veure figura 2.3). Començant a l'origen, la corba augmenta gradualment però amb valors molt petits d'intensitat i voltatge, fins que la tensió aplicada supera la tensió llindar. A partir d'aquest valor, la intensitat augmenta ràpidament per a molt petits increments de tensió, donant lloc a una corba no lineal de pendent molt pronunciat. Quan la llum incideix sobre la cèl·lula, la corba es desplaça cap avall a mesura que la cèl·lula va generant potència. Com que la cèl·lula és generadora, per conveni s'inverteix l'eix de corrent, i resulta la corba I-V amb la següent equació:

$$I = I_L - I_0 \left[ \exp\left(\frac{qV}{nkT}\right) - 1 \right] \quad (\text{Eq. 2.1})$$

on  $I_L$  és el corrent generat per la llum,  $I_0$  és el corrent de saturació de polarització inversa,  $q$  és la càrrega de l'electró,  $n$  és el factor d'idealitat del díode,  $k$  és la constant de Boltzmann ( $1,38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$ ) i  $T$  és la temperatura de la cèl·lula. El terme  $-1$  és habitualment menyspreable ja que el terme exponencial és molt superior excepte per voltatges menors que  $100 \text{ mV}$ .



**Figura 2.3:** Corba I-V d'un díode polaritzat en directa sense llum incident (esquerra) i corba I-V típica d'un mòdul fotovoltaic (dreta).

Els següents paràmetres són extrets a partir de la corba I-V:

- **Corrent de curtcircuit ( $I_{sc}$ )**

Corrent màxim que la cèl·lula pot produir, quan el voltatge és zero. Idealment, quan  $V=0$ ,  $I_{sc}=I_L$ . Aquest valor és directament proporcional a la llum disponible. En ocasions, en comptes del valor de corrent es dona el valor de la densitat de corrent de curtcircuit ( $J_{sc}$ ), que és la intensitat per unitat d'àrea.

- **Voltatge de circuit obert ( $V_{oc}$ )**

Voltatge que la cèl·lula produeix quan pel circuit de la cèl·lula no passa corrent. És el voltatge màxim que pot assolir la cèl·lula i augmenta logarítmicament quan s'incrementa la llum solar disponible.

Quan  $I=0$ , i com es pot deduir de l'equació 2.1:

$$V_{oc} = \frac{nKT}{q} \ln \left( \frac{I_L}{I_0} + 1 \right) \quad (Eq. 2.2)$$

- **Punt de màxima potència (MPP)**

Punt del gràfic en què el corrent i el voltatge fan que la potència de la cèl·lula solar sigui la més gran assolible. Com que la potència és el producte del corrent i la intensitat, el punt de màxima potència es troba al vèrtex en contacte amb la corba I-V del rectangle format amb els dos eixos d'àrea més gran que pot cabre a sota de la corba.

Per optimitzar el valor de potència de sortida s'utilitzen uns dispositius electrònics anomenats MPPT (*maximum power point trackers* o seguidors del punt de màxima potència), que en instal·lacions solars fotovoltaïques se situen en el regulador de tensió quan el sistema està connectat a una bateria o en l'inversor quan ho està a la xarxa elèctrica.

- **Factor d'ompliment (FF)**

Rati entre el valor de potència màxima assolible i el valor de potència màxima ideal, que és:

$$FF = \frac{P_{max}}{P_t} = \frac{V_{mpp} I_{mpp}}{V_{oc} I_{sc}} \quad (Eq. 2.3)$$

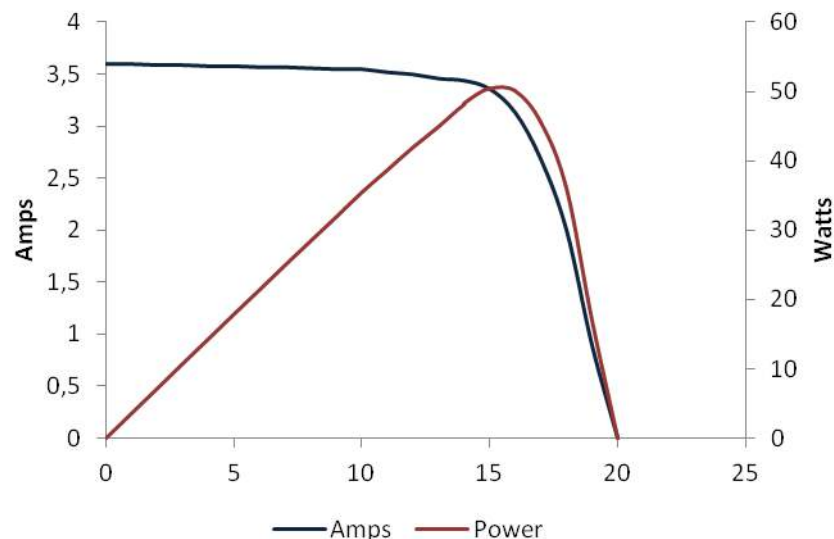
Gràficament, el factor d'ompliment és una mesura de com de quadrada és la corba. Interessa que el seu valor sigui elevat (el més proper a 1) i això correspon a una corba I-V més quadrada.

- Eficiència ( $\eta$ )

Rati entre la potència elèctrica de sortida mesurada i l'energia solar que arriba a la cèl·lula PV. Correntment, es pren com a potència de sortida la potència màxima assolible per la cèl·lula.

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{P_{max}}{P_{in}} \quad (Eq. 2.4)$$

La potència d'entrada ( $P_{in}$ ) es calcula fent el producte de la irradiància de la llum incident amb la superfície de la cèl·lula en  $m^2$ . El valor que es pren normalment per a la irradiància és de  $1000 \text{ W/m}^2$ . Per comparar eficiències entre cèl·lules és molt important fer-ho en les mateixes condicions, ja que el seu valor així com el dels altres paràmetres de la corba depenen molt de condicions ambientals com la temperatura i la intensitat i espectre de la llum incident.



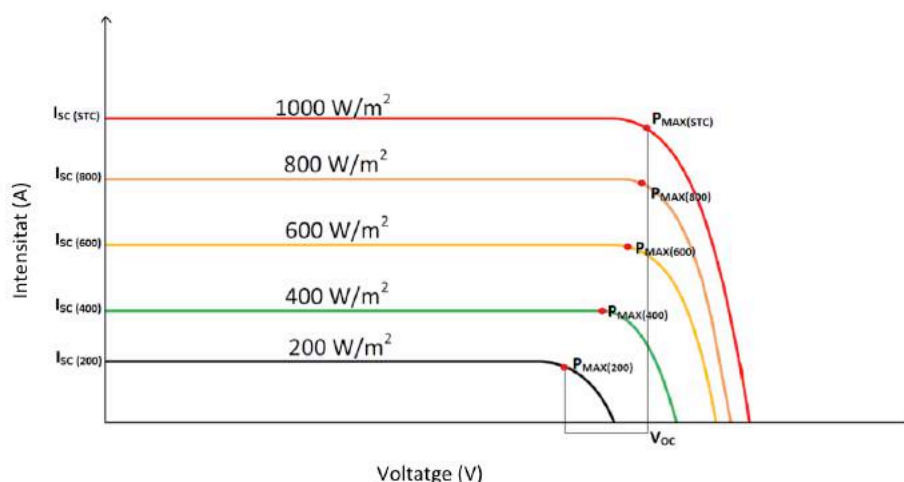
**Figura 2.4:** Corba I-V típica d'un mòdul fotovoltaic i corba de la potència de sortida.

## 2.4. Efecte de les condicions de contorn sobre el rendiment de la cèl·lula

### 2.4.1. Efecte de la irradiància

El rendiment d'una cèl·lula o mòdul es veu afectat per la variació de la irradiància solar. Per a la caracterització dels mòduls s'ha especificat una irradiància estàndard de  $1000 \text{ W/m}^2$ , però aquest valor es veu reduït si, com en la majoria de les situacions, la llum no arriba perpendicularment a la superfície o hi ha elements obstructius, com ara núvols, edificis o arbres, que dificulten que la llum incideixi en el dispositiu fotovoltaic. El corrent de curtcircuit ( $I_{sc}$ ) o densitat de curtcircuit ( $J_{sc}$ ) és directament proporcional a la irradiància, ja que aquest

determina el valor del corrent generat per la llum ( $I_L$ ) que, alhora, determina el valor de corrent de sortida, tal i com s'explicita en l'equació 2.1. Per tant, els valors de corrent són molt sensibles a les variacions d'irradiància. D'altra banda, l'efecte d'aquestes variacions sobre el voltatge és petita i normalment negligible. La següent figura indica gràficament la variació de la corba I-V segons la irradiància incident.



**Figura 2.5:** Variació de la corba I-V amb diferents valors d'irradiància incident.

Com es pot veure, en reduir-se els valors de corrent quan la irradiància disminueix, també ho fa el punt de màxima potència.

#### 2.4.2. Efecte de la temperatura

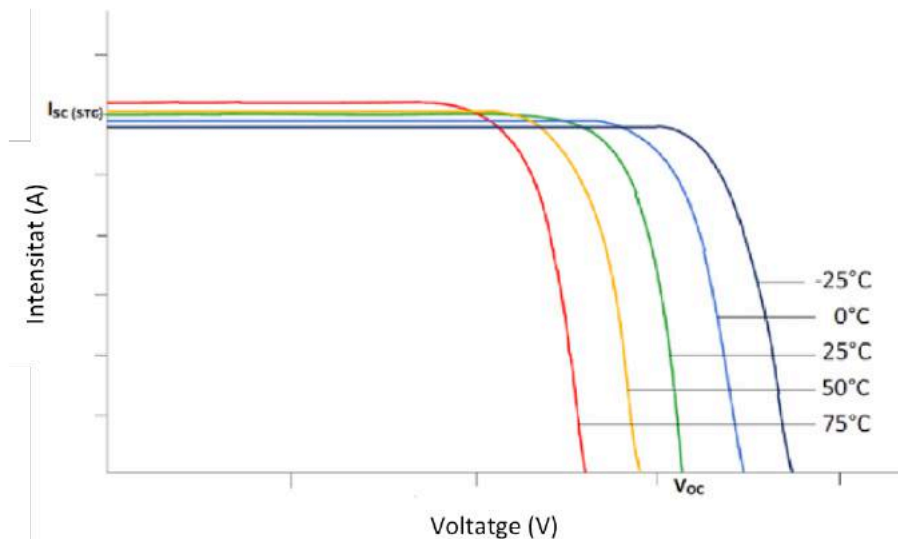
La temperatura de funcionament d'una cèl·lula fotovoltaica és determinada per la temperatura ambient, per les característiques de la pròpia cèl·lula, per la intensitat de la llum solar incident i per altres variables, com ara la velocitat del vent.

Com tots els materials semiconductors, les cèl·lules fotovoltaïques són sensibles a la temperatura. Quan aquesta augmenta, es redueix l'energia de banda prohibida o *band gap*, i això afecta els paràmetres del material. L'efecte de la temperatura sobre la intensitat del corrent de saturació,  $I_0$ , es pot veure en la següent equació simplificada,

$$I_0 = BT^\gamma \exp\left(\frac{-E_{g0}}{kT}\right) \quad (\text{Eq. 2.5})$$

on  $B$  és independent de la temperatura,  $E_{g0}$  és l'energia o *band gap* extrapolat linealment a zero absolut i  $\gamma$  inclou les dependències de temperatura de la resta de paràmetres que determinen  $I_0$ . La intensitat del corrent de saturació, per tant, augmenta amb la temperatura d'acord a l'equació anterior.

La reducció de l'energia de *band gap* fa que més electrons tinguin l'energia suficient de passar de la banda de valència a la banda de conducció i això es tradueix en un petit increment en el corrent de curtcircuit quan la temperatura de funcionament puja. No obstant això, el principal efecte de l'augment de la temperatura és reducció del voltatge de circuit obert,  $V_{OC}$ , i del factor d'ompliment  $i$ , per tant, del rendiment de la cèl·lula. Per tant, es pot afirmar que, tot i que en diferent mesura per als diferents tipus de cèl·lules solars, l'eficiència es veu reduïda en tots els casos quan la temperatura de la cèl·lula augmenta.



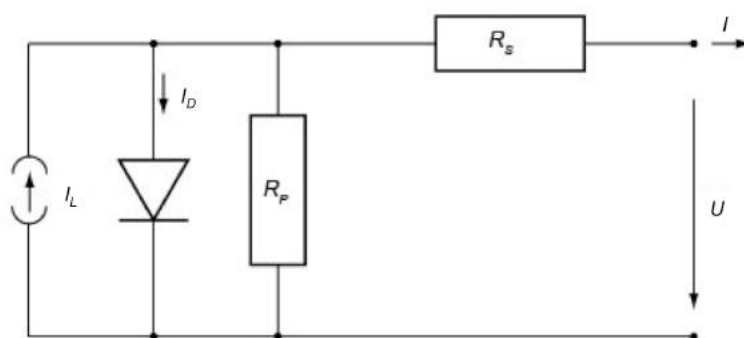
**Figura 2.6:** Variació de la corba I-V en condicions de temperatura diferents.

L'impacte de la temperatura sobre un panell solar es coneix com a coeficient de temperatura. Habitualment, les cèl·lules solars són provades a 25°C i el coeficient representa el canvi d'eficiència per cada grau augmentat, sovint expressat en forma de percentatge negatiu.

#### 2.4.3. Efecte de les resistències

Com s'ha esmentat anteriorment, el comportament d'una cèl·lula solar amb llum incident s'assimila al d'un díode en paral·lel amb una font de corrent i d'aquí s'extreu l'equació 2.1 comentada. No obstant, aquesta equació contempla un comportament ideal de la cèl·lula, quan en realitat hi ha pèrdues resistives que contribueixen a la reducció de l'eficiència i el factor d'ompliment. El circuit típic d'una cèl·lula solar es pot modelar com un díode en paral·lel amb una font de corrent, que correspon a la llum de sol, amb una resistència en sèrie ( $R_s$ ) i una resistència en paral·lel ( $R_p$ ), que idealment són zero i infinit, respectivament.





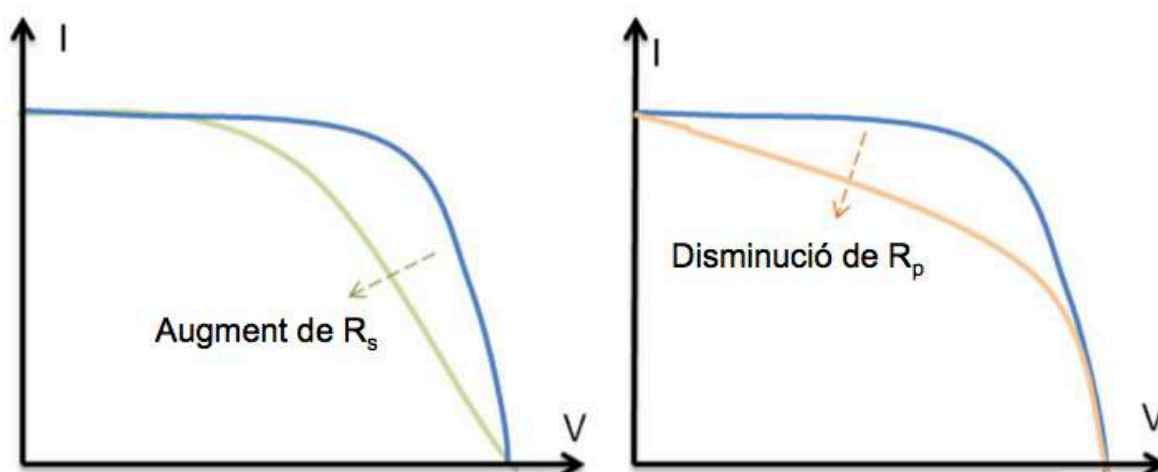
**Figura 2.7:** Circuit d'una cèl·lula fotovoltaica, amb font de corrent, díode i elements resistius en paral·lel i en sèrie.

La intensitat de sortida es pot expressar mitjançant la següent equació:

$$I = I_L - I_0 \exp \left[ \frac{q(V + IR_s)}{nkT} \right] - \frac{V + IR_s}{R_p} \quad (\text{Eq. 2.6})$$

La resistència en sèrie ( $R_s$ ) compren la resistència volumètrica del material semiconductor, les interconnexions i contactes metàl·lics i la resistència de contacte entre els contactes metàl·lics i els semiconductors. És un paràmetre de disseny que s'ha de tenir molt en compte en cada tipus i mida de cèl·lula per a obtenir una eficiència òptima. La resistència en sèrie origina una caiguda de voltatge ( $\Delta V = I \cdot R_s$ ).

La resistència en paral·lel ( $R_p$ ) ve donada per la no idealitat de la unió p-n i les impureses a prop d'aquesta, sobretot en els límits de la cèl·lula. Al contrari de la resistència en sèrie, que té a veure amb el disseny de la cèl·lula, aquesta s'origina per defectes en la fabricació. Una resistència en paral·lel petita suposa un camí alternatiu pel corrent generat per la llum ( $I_L$ ), pel qual el corrent que travessa la cèl·lula es redueix ( $\Delta I = V/R_s$ ).



**Figura 2.8:** Efectes de la variació de resistències sobre la corba I-V.

#### 2.4.4. Efecte *light-soaking*

Per a qualsevol tecnologia fotovoltaica, l'evolució del rendiment del dispositiu sota una il·luminació de durada perllongada és un pas de caracterització essencial, ja que l'exposició a la llum produeix una sèrie d'efectes sobre l'aparell que influeixen en el seu rendiment, tant inicial com estabilitzat a llarg termini [2]. Per a algunes tecnologies, aquests efectes tenen un impacte molt més gran que en altres. Els canvis que es donen poden ser fenòmens metastables reversibles, pels quals el rendiment del dispositiu fotovoltaic pot alternar entre diferents estats depenent de la seva història d'il·luminació rebuda, polarització elèctrica i temperatura, i també efectes a llarg termini, en els quals el rendiment del dispositiu queda fonamentalment alterat.



### 3. Estructura de les cèl·lules solars

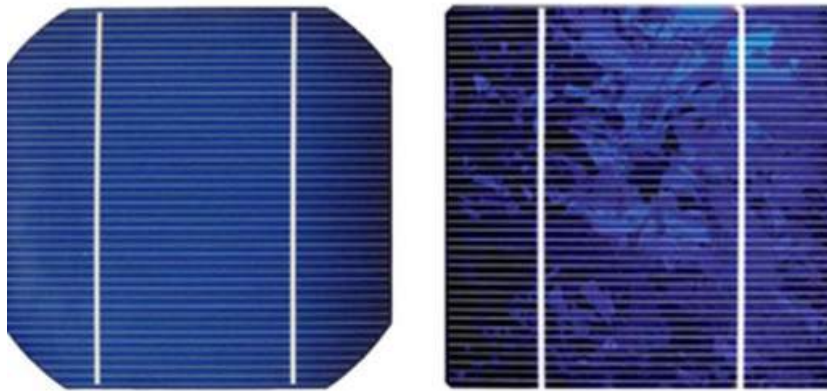
En aquest capítol s'analitzaran les estructures i els materials que constitueixen les cèl·lules fotovoltaïques d'interès per a aquest treball, que són les de silici cristal·lí i les orgàniques en base de polímers.

#### 3.1. Cèl·lules fotovoltaïques de silici

Per al correcte funcionament d'una cèl·lula fotovoltaïca de silici, aquesta ha de comptar, com a mínim, amb tres elements estructurals, (i) l'absorbidor dels fotons incidents, que utilitza l'energia dels fotons per excitar els electrons de la banda de valència, on s'origina un forat, a la banda de conducció, (ii) una membrana que impedeixi la recombinació dels portadors de càrrega i (iii) contactes que permetin la recol·lecció dels portadors de càrrega i la interconnexió amb altres cèl·lules o amb una càrrega externa [3].

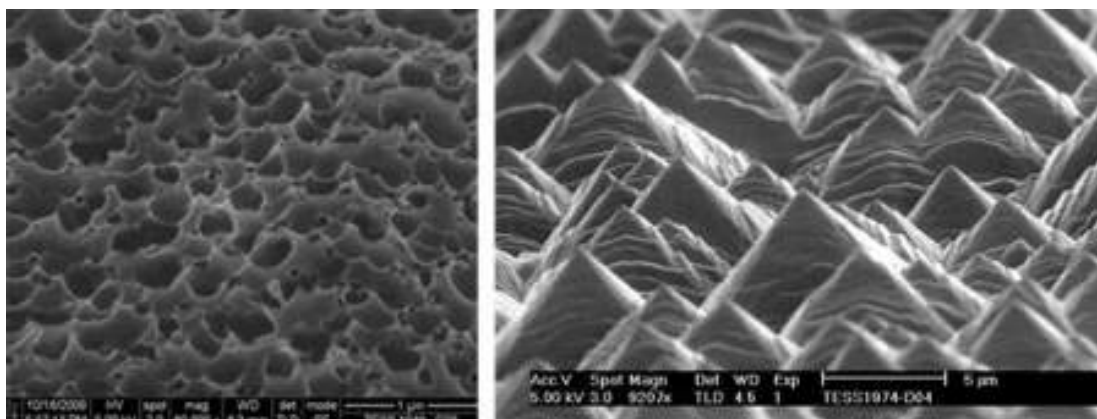
La funció de l'absorbidor és satisfeta per un semiconductor, com ara el silici. El silici pur és un semiconductor intrínsec, en què el nombre d'electrons excitats i forats és el mateix ( $n=p$ ). Això fa que la seva conductivitat sigui baixa, ja que els electrons no s'hi poden moure lliurement sense l'aportació d'energia com, per exemple, calor. És per això que el silici es dopa amb altres partícules que poden tenir un electró més o un electró menys a la capa de valència. El fòsfor, amb cinc electrons a la capa de valència, s'utilitza per introduir electrons lliures al silici, que passa a ser de tipus N. D'altra banda, quan les impureses són àtoms de bor, amb tres electrons a la capa de valència, el silici té forats lliures i transporta càrrega positiva i s'anomena de tipus P. Les àrees adjacents dels dos tipus de silici formen la unió p-n, que realitza funció de la membrana esmentada anteriorment.

L'estructura més comú d'una cèl·lula de silici cristal·lí, tant monocristal·lí com policristal·lí, es basa en un *wafer* (hòstia) que consisteix en silici dopat amb impureses acceptores (bor), per tant, de tipus P. Les funcions que ha de complir aquest material són absorbir eficientment els fotons incidents, permetre la difusió dels portadors minoritaris de càrrega (els electrons) i ser un bon conductor per facilitar el transport dels portadors majoritaris (forats) cap als contactes. En el cas del silici monocristal·lí, aquest *wafer* és proper a un quadrat i amb geometria radial als cantons, mentre que pel silici policristal·lí, és quasi quadrat i amb les cantonades lleugerament bisellades.



**Figura 3.1:** Exemple de la morfologia d'una cèl·lula de silici monocristal·lí (esquerra) i una de silici policristal·lí (dreta).

La superfície frontal del *wafer*, que és l'encarregada d'absorbir la llum incident, és texturitzada per minimitzar les pèrdues degudes a la reflexió de la llum, refractar la llum incident en el silici a grans angles i augmentar el camí òptic a dins del silici. Per al silici monocristal·lí i per al policristal·lí, aquesta superfície texturitzada consisteix en una distribució aleatòria de piràmides i valls arrodonides, respectivament.



**Figura 3.2:** Imatges microscòpiques de les superfícies texturitzades del silici policristal·lí (esquerra) i monocristal·lí (dreta).

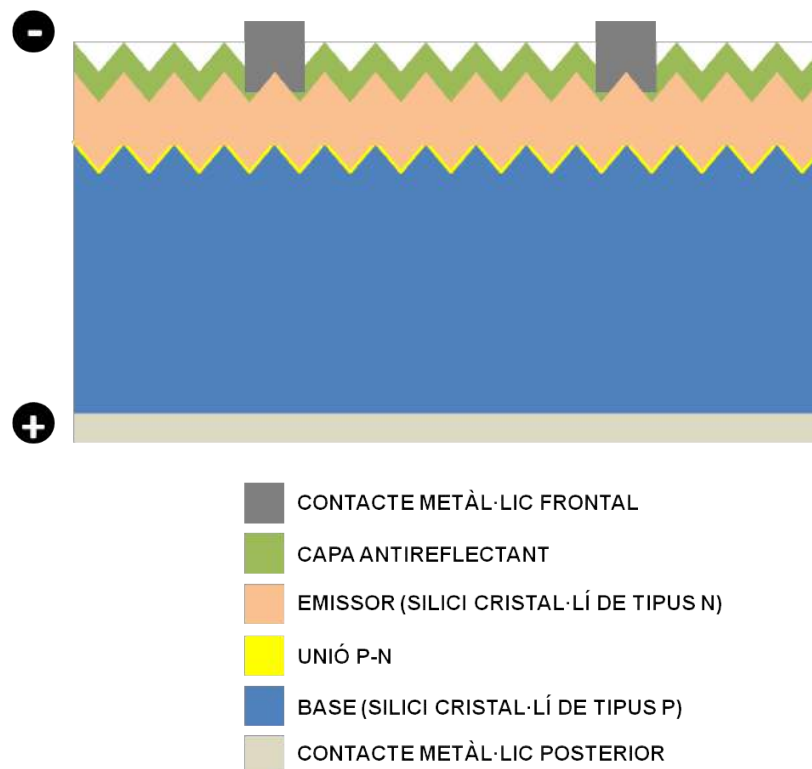
Per tal de crear la unió p-n per separar els portadors de càrrega, hi ha una capa de silici superior dopada amb fòsfor, que a més serveix per a la difusió dels portadors minoritaris (en aquest cas, els forats) i ha d'assegurar una suficient conductivitat per a que els portadors majoritaris (electrons) siguin transportats cap als contactes. Aquesta capa, situada a la part frontal de la cèl·lula, és molt més prima que el *wafer* base de silici de tipus P, amb un gruix de menys d'1 µm.

La part frontal es revesteix amb una capa molt prima (de l'ordre de nanòmetres  $\approx 75\text{nm}$  [3]) antireflectant, convencionalment de nitrur de silici amorf hidrogenat ( $\text{a-SiN}_x\text{:H}$ ). Aquesta capa té com a objectius maximitzar la transmissió òptica de la llum incident i, simultàniament,

suprimir la recombinació superficial de la parella electró-forat. A més a més, actua com a barrera per a la humitat, de manera que protegeix les capes inferiors dels efectes degradants causats per aquesta.

Els contactes metàl·lics frontals se situen immediatament a sobre de la capa de nitrur de silici. Per tal de no bloquejar l'arribada de la llum al silici, aquests contactes són fines línies de metall, normalment alumini, que formen un patró continu que ocupa un petit percentatge de la superfície de la cèl·lula (aproximadament, un 8%). Aquests contactes se subdivideixen en dos grups: contactes de *finger* i *busbars* o barres col·lectores. Els contactes de *finger* tenen unes dimensions d'aproximadament 100  $\mu\text{m}$  d'ample i 20  $\mu\text{m}$  de gruix i se situen paral·lelament a uns 2 mm de distància. Presenten una resistència de contacte baixa amb la capa inferior de silici de tipus N i una excel·lent conductivitat lateral per al transport eficient de càrregues negatives. Els *busbars* tenen unes dimensions una mica més grans (1,5 mm d'ample i 20  $\mu\text{m}$  de gruix) i tenen la principal funció de recol·lectar el corrent dels contactes de *finger* [3].

La part del darrera de la cèl·lula és totalment metal·litzada i té com a funció principal un eficient transport de les càrregues positives. El material normalment utilitzat és l'alumini.



**Figura 3.3:** Esquema de l'estructura bàsica d'una cèl·lula fotovoltaica de silici cristal·lí.

### 3.2. Cèl·lules fotovoltaiques orgàniques

L'estructura bàsica d'una cèl·lula fotovoltaica orgànica és una capa activa composta de dos tipus de material orgànic, un acceptor d'electrons i l'altre donador, i dos elèctrodes metàl·lics transparents a sobre i a sota de la regió activa. Per afavorir l'extracció d'electrons i forats, també s'inclouen unes capes anomenades transportadores de portadors de càrrega (una pels electrons, i l'altra pels forats), que se situen directament a sobre i a sota de la capa activa, en contacte amb els elèctrodes.

A continuació s'analitzen els materials que formen cada capa per tal de conèixer els més adients per a la preparació de mòduls fotovoltaics orgànics semitransparents per a la seva instal·lació en edificis. En tots els casos es considera un procés de manufactura a l'aire i basat en solucions dels materials corresponents aplicats mitjançant tècniques de recobriment o impressió.

#### 3.2.1. Elèctrode inferior

És un elèctrode que es col·loca sobre el substrat, habitualment politereftalat d'etilè o PET, que és un polímer termoplàstic lleuger, resistent i transparent, i sobre el qual es disposen la resta de capes. En la majoria de dispositius fotovoltaics, aquest elèctrode és per on incideix la llum, per tant la seva transparència, a més de la del substrat, és fonamental per a la captació de la llum. El material més utilitzat és l'ITO (òxid d'indi i estany) per les seves característiques favorables: alta transmitància espectral (més del 90%), baixa resistència de làmina<sup>1</sup> (fins a  $10 \Omega/\text{m}^2$  sobre vidre) i superfície llisa (de 2.5 a 3 nm en rugositat). Pel contrari, el cost de l'indi és molt elevat per la seva escassetat a l'escorça terrestre, tot i que la major part de l'alt cost de l'elèctrode a base d'ITO (fins a un 98%) ve donada pel lent procés de polvorització en fase vapor, que a més genera una gran quantitat de material sobrant (aproximadament un 70%) que ha de ser recollit i reciclat [4]. A més a més, en ser un material ceràmic, els elèctrodes d'ITO són fràgils i propensos a esquerdar-se. Aquests desavantatges fan que hagin sorgit alternatives a aquest material, que s'especifiquen en la següent taula.

---

<sup>1</sup> La resistència de làmina de l'elèctrode conductor determina la conductivitat d'aquest i influeix en el factor d'ompliment i la densitat de corrent de curtcircuit (per tant, l'eficiència) i per això se'n desitgen valors baixos (al voltant de  $10 \Omega/\text{m}^2$ ).

**Taula 3.1:** Alternatives a l'ITO per a l'elèctrode inferior transparent.

ALTERNATIVA	PROS	CONTRES
PEDOT:PSS	<ul style="list-style-type: none"> <li>Polímer transparent i conductor.</li> <li>Rendiment no suficientment bo per a aplicacions d'alta capacitat de corrent.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Resistències de làmina elevades (encara que potencialment millors que les de PEDOT:PSS).</li> </ul>
Nanotubs de carbó	<ul style="list-style-type: none"> <li>Flexible i durable.</li> <li>Compatible amb processament R2R.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Resistències de làmina elevades (encara que potencialment millors que les de PEDOT:PSS).</li> </ul>
Grafè	<ul style="list-style-type: none"> <li>Propietats òptiques i elèctriques similars a les de l'ITO quan el processament és correcte.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Car.</li> </ul>
Metalls (Ag, Cu, Au) – microescala	<ul style="list-style-type: none"> <li>50 vegades més conductors que ITO.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>No gaire transparent en films continus.</li> <li>Cost de fabricació no prou baix.</li> </ul>
Metalls – nanoescala	<ul style="list-style-type: none"> <li>Rendiment equivalent o millor que el de l'ITO.</li> <li>En el cas dels nanocables de plata (AgNW), es pot assolir una transparència del 95% a una resistència de làmina de <math>20 \Omega/\text{m}^2</math>.</li> <li>Compatible amb el processament R2R.</li> <li>Molt més flexibles i estirables.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>La plata és més cara que l'indi.</li> <li>Rugositat superficial no òptima.</li> </ul>
IMI (ITO-metall-ITO)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Més flexible.</li> <li>Resistència de lamina més baixa (<math>7 \Omega/\text{m}^2</math>).</li> <li>Transmitància lleugerament més alta en el rang visible.</li> <li>Les propietats elèctriques de la pila poden ser ajustades canviant el gruix de les capes que la formen.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Més car</li> </ul>

### 3.2.2. Capa activa

Com s'ha dit anteriorment, en el punt relatiu a la teoria fotovoltaica orgànica, els materials de la capa activa són els encarregats de dur a terme l'absorció de la llum incident i de captar els portadors de càrrega perquè es pugui donar l'efecte fotovoltaic de conversió de llum en energia elèctrica. Normalment, la capa activa és constituïda per una mescla binària (BHT o *bulk heterojunction*) d'un polímer i un fullerè o de dos polímers, que actuen com a fase donadora i fase acceptora. D'aquests materials depèn enormement l'eficiència i el rendiment de la cèl·lula, però també són molt sensibles a l'escalat, és a dir, en canviar d'escala de laboratori a una escala major, desitjada per a produccions de gran volum, presenten diversos problemes, majoritàriament degut al gruix.

Generalment, el gruix de la capa activa d'una cèl·lula fotovoltaica orgànica té com a límit 100 nm degut a les baixes mobilitats dels portadors de càrrega dels semiconductors



orgànics constituents (especialment, el donador). A partir dels 100 nm de gruix, es produeix una caiguda de factor d'ompliment considerable per a algunes combinacions de donador-acceptor eficients a petita escala [5]. Per aquest motiu, s'han de triar uns materials que combinin un bon rendiment de la cèl·lula o mòdul amb una relativament bona escalabilitat.

L'eficiència més alta documentada per a cèl·lules solars polimèriques (a escala laboratori) és de 9,2% per a una capa activa basada en la combinació de materials PTB7:PC<sub>71</sub>BM, on el PTB7<sup>2</sup> és el donador i el PC<sub>71</sub>BM (derivat del fullerè normalment simplificat com a PCBM), l'acceptor. No obstant això, aquesta és una combinació donador-acceptor que pateix una gran reducció del factor d'ompliment quan se'n fa l'escalat [6]. La combinació de materials més utilitzada en la recerca per a la capa activa de les cèl·lules fotovoltaïques pensades per a ser escalades és P3HT:PCBM que, tot i exhibir una eficiència més modesta (5,13% la més alta registrada), pot oferir un factor d'ompliment de més del 0,6 per a gruixos de pel·lícula de més de 200 nm. El P3HT<sup>3</sup> actua de donador i absorbidor de la llum mentre que el PCBM n'és l'acceptor. Els avantatges d'utilitzar aquests polímers són l'alta mobilitat dels portadors de càrrega en el P3HT, així com la bona processabilitat d'aquest, compatible amb tècniques a l'aire de recobriment i impressió (de les quals es parla en l'apartat 4.1.) i l'eficient dissociació dels excitons a la interfície entre els dos materials.

### 3.2.3. Capes transportadores de portadors de càrrega

La capa transportadora d'electrons ha d'estar formada per un material amb alta afinitat electrònica i alta mobilitat dels electrons. Els electrons flueixen a través de la capa mentre que els forats són bloquejats i no la poden penetrar. Diversos materials han estat utilitzats per a aquesta capa, com ara el fluorur de liti (LiF) i els òxids de titani i de crom (TiO<sub>x</sub> i CrO<sub>x</sub>). El més utilitzats és l'òxid de zinc (ZnO) per la seva alta mobilitat d'electrons, transparència a la radiació solar i la seva compatibilitat amb sistemes *roll-to-roll*, ja que pot ser aplicat en forma de pel·lícula fina a partir d'una solució prèvia d'acetat de zinc o nanopartícules en aigua [7].

La capa transportadora de forats ha d'estar formada per un material de característiques oposades a la transportadora d'electrons, això és, favorable a la recol·lecció de forats i al rebuig d'electrons. Indiscutiblement, el material més utilitzat per a satisfer aquests requeriments és el polímer PEDOT:PSS<sup>4</sup> per la seva bona conductivitat elèctrica i una transparència en el rang visible de més del 80%. No obstant això, és un material altament

<sup>2</sup> (C<sub>41</sub>H<sub>53</sub>FO<sub>4</sub>S<sub>4</sub>)<sub>n</sub>

<sup>3</sup> (C<sub>10</sub>H<sub>14</sub>S)<sub>n</sub>

<sup>4</sup> Poli(3,4-etilendioxitiofè)-poli(estirè sulfonat)

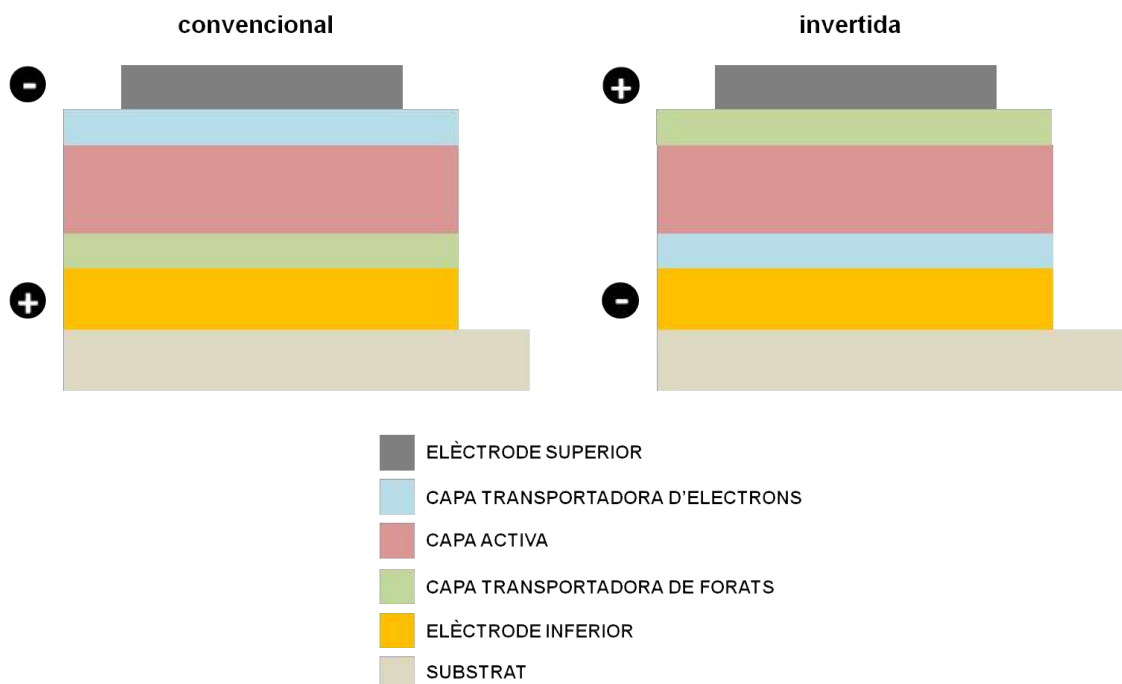
higroscòpic (amb la capacitat d'absorbir humitat del medi) i això es pot traduir en males morfologies de capa i en un augment de la resistivitat en la interfície entre el PEDOT:PSS i la capa activa, que dóna lloc a un rendiment elèctric més pobre. Per a reduir la naturalesa hidròfila d'aquest material es poden utilitzar additius com ara alcohol isopropil o tensioactius, que han demostrat una millora en la morfologia de la capa i en els paràmetres elèctrics de la cèl·lula [7]. L'addició d'aquests components, però, es tradueix en un encariment del material [8].

#### 3.2.4. Elèctrode superior

La selecció d'aquest elèctrode depèn de la seva estabilitat en condicions ambientals i la seva aptitud per a ser processat a partir de solucions. Les tintes basades en nanopartícules metàl·liques, com ara de plata o de coure, aconseguixen una bona conductivitat alhora que mantenen les seves propietats en contacte amb l'aire [6].

#### 3.2.5. Tipus d'estructura

Segons l'ordre d'aquestes capes i la posició dels elèctrodes, es pot parlar d'estructura convencional o invertida de la cèl·lula fotovoltaica.



**Figura 3.4:** Esquema de les estructures convencional i invertida

Com es pot veure, en la estructura invertida els electrons són recol·lectats per l'elèctrode inferior, mentre que els forats ho són pel superior, en contacte amb l'aire.

Per a la fabricació dels mòduls fotovoltaics a l'aire s'ha de tenir en compte la interacció amb l'ambient dels materials utilitzats, a més a més de la interacció entre les pròpies capes i en això hi té molt a veure el tipus d'estructura utilitzat. Les estructures invertides van sorgir a arrel dels problemes d'estabilitat de les normals. El metall de l'elèctrode superior de les estructures convencionals ha de tenir una funció de treball baixa per tal que l'alineació del nivell d'energia amb les altres capes sigui la correcta. Això implica utilitzar materials com l'alumini, que en exposar-se a l'aire són molt susceptibles a l'oxidació i, per tant, a la pèrdua de conductivitat. Contràriament, l'ús de materials amb elevades funcions de treball, que és possible quan l'estructura és invertida perquè afavoreix la recol·lecció de forats, evita la ràpida degradació i oxidació de l'elèctrode. A més, en les estructures invertides s'elimina la interacció entre la capa transportadora de forats (normalment PEDOT:PSS, de naturalesa acídica) amb l'òxid de metall de l'elèctrode inferior (com l'ITO), que de l'altra manera experimentaria problemes de degradació ràpida [6].

### 3.2.6. Cristall fotònic

Com s'ha vist, els *wafers* que configuren les plaques fotovoltaïques inorgàniques de silici cristal·lí s'acostumen a texturitzar per a assolir una millor absorció de la irradiació incident, que es tradueix en un rendiment superior del dispositiu. En les tecnologies fotovoltaïques de pel·lícula fina la texturització no és un procediment òptim, de manera que s'han de trobar altres tècniques per a minimitzar la quantitat de llum que s'escapa sense ser absorbida per a poder generar corrent. Això és especialment important en el cas de les cèl·lules o mòduls fotovoltaics d'estudi ja que, per assolir el grau de transparència desitjat, el gruix de l'elèctrode metàl·lic superior (en aquest cas, de nanocables de plata) s'ha de limitar molt, la qual cosa suposa una notable reducció en la seva reflectivitat i capacitat de recol·lecció de fotons.

L'alternativa triada per als mòduls d'estudi és afegir una estructura multicapa anomenada cristall fotònic, capaç de tornar a reflectir cap a la cèl·lula fotons d'una certa longitud d'ona (infraroja o ultraviolada), de tal manera que s'incrementa la capacitat absorbidora del dispositiu fotovoltaic. Alhora, el cristall fotònic ha de deixar passar-hi a través fotons d'altres longituds d'ona (en el rang visible) per garantir la semitransparència del producte final. L'estructura es forma a partir de l'alternació de capes de material d'alt i baix índex refractant, en aquest cas, òxid de titani ( $\text{TiO}_2$ ) i òxid de silici ( $\text{SiO}_2$ ), respectivament.

El cristall fotònic es produeix paral·lelament al mòdul fotovoltaic i després es lamina amb aquest, abans del procediment de laminació final amb vidre. El resultat és un mòdul amb un rendiment fotovoltaic menor que el que tindria si fos opac però major que el que tindria el mòdul semitransparent sense el cristall fotònic [9].

## 4. Producció dels mòduls fotovoltaics

### 4.1. Estat de l'art de la producció de mòduls fotovoltaics de pel·lícula fina

Les tècniques més comuns per a la producció de mòduls orgànics fotovoltaics basats pel·lícula fina són la impressió o recobriment de cada capa en forma de dissolució o la deposició de partícules mitjançant evaporació. Per la seva bona adaptació a processos a gran escala, la rapidesa del procediment i la disponibilitat de tintes a preus raonables, en aquest treball es consideren les diferents opcions d'impressió i recobriment, posant èmfasi en aquelles tècniques en què es pot implementar la tecnologia contínua del *roll-to-roll* per a totes les capes.

En els sistemes *roll-to-roll* (R2R), el substrat es troba en forma d'un rotllo continu de material que passa per diversos processos. A part dels reglamentaris bobinat, recobriment/impressió i desbobinat de material, també compta opcionalment amb etapes de neteja, tractaments previs i posteriors, escalfament i assecat, entre d'altres. Els sistemes R2R, a més, són comunament barats, ràpids, i la continuïtat del substrat permet eliminar els possibles errors de manipulació entre processos que es donen en els procediments en sèrie. Tots aquests atributs fan que el processament mitjançant R2R sigui especialment adient per a produccions de grans volums [10].

Hi ha multitud de tècniques per a la producció de mòduls orgànics fotovoltaics basats en dissolucions, mitjançant impressió i recobriment:

- Fundició
- Recobriment per centrifugació (*Spincoating*)
- *Doctor blading*
- Impressió per pantalla rotativa (*Screen printing*)
- Impressió *inkjet*
- *Pad printing*
- Recobriment per boca de ranura (*Slot die*)
- Recobriment per gravat

Els més rellevants per a la producció de mòduls fotovoltaics orgànics a diverses escales s'exposen a continuació.

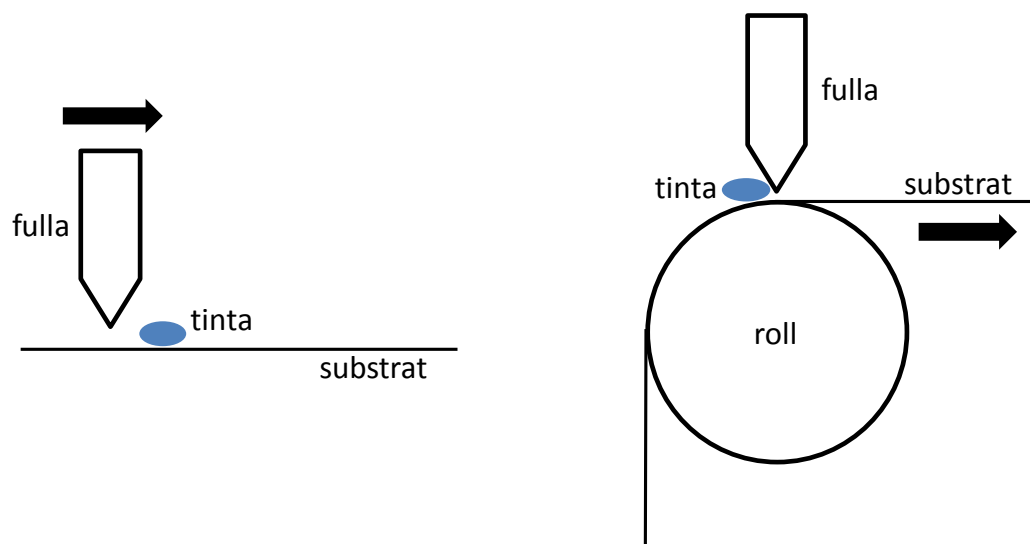
#### 4.1.1. *Spincoating* (Recobriment per centrifugació)

És la tècnica més important fins ara per a la producció de cèl·lules solars. Consisteix en aplicar líquid a un substrat, que és accelerat a una velocitat rotacional específica i això fa que en quedi una fina pel·lícula de ràpid assecat a sobre. Les propietats de gruix, morfologia

i topografia de la superfície de la pel·lícula final son altament reproduïbles i depenen en gran mesura de la velocitat de gir, viscositat, volatilitat, difusivitat, pes molecular i concentració dels soluts. La precisió d'aquest mètode és el motiu pel qual el *spincoating* ha estat la tècnica de recobriment més utilitzada a escala de laboratori. No obstant això, presenta desavantatges quant a la producció a gran escala, ja que és un procediment en sèrie en què cada substrat és manipulat individualment i, per tant, té un rendiment menor i és més lent. A més a més, no permet fer patrons per a la connexió elèctrica entre les capes dels mòduls i genera molt residu de material, ja que durant el recobriment la majoria del líquid aplicat és ejectat [10].

#### 4.1.2. *Doctor blading*

La tinta és dipositada a sobre del substrat mitjançant una fulla de revestiment esmolada que es troba a una distància fixada de la superfície del substrat (normalment entre 10 i 500  $\mu\text{m}$ ). Aquesta fulla es mou linealment i a una velocitat constant per estendre la tinta posicionada al seu davant, de manera que el resultat és una pel·lícula humida a sobre del substrat. La rugositat i morfologia de la pel·lícula queden determinades per les propietats de la dissolució i el substrat i pels paràmetres de la fulla (distància al substrat, velocitat). Aquesta tècnica és vàlida per a grans àrees actives, genera poc residu de material i es pot transferir a sistemes R2R fent que la fulla sigui estacionària i el substrat sigui el que es mogui a velocitat constant (*knife-over-edge*).



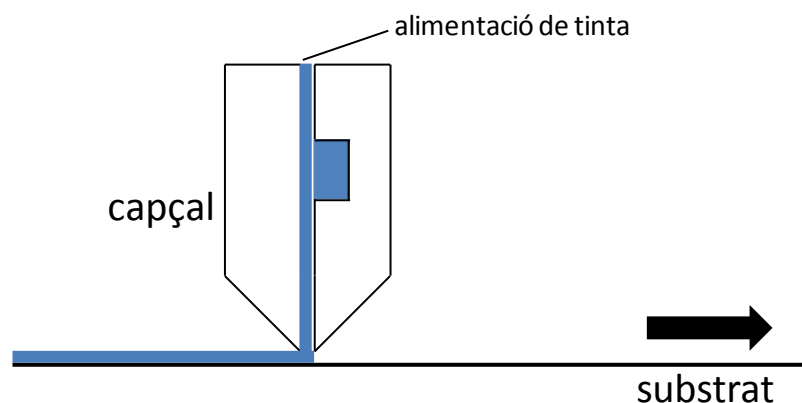
**Figura 4.1:** Doctor blading convencional (esquerra) i doctor blading adaptat a roll-to-roll o knife-over-edge (dreta)

#### 4.1.3. Impressió *inkjet*

Aquest mètode consisteix en la formació de pel·lícules primes a partir d'una imatge digital i mitjançant l'ejecció de gotes petites de solvent per part d'unes embocadures piezoelèctriques. Les gotes són posicionades, esteses i aglutinades sobre la superfície, i formen una pel·lícula humida que s'asseca i esdevé sòlida gràcies a mecanismes d'evaporació. El gruix en sec de la pel·lícula ve donat pel nombre de gotes per àrea. Amb l'ús d'aquesta tècnica s'aconsegueix un estalvi de material gràcies al patronatge digital i la contaminació es minimitza ja que no existeix contacte en el mètode de deposició. A més, es compatible amb R2R i pot crear patrons complexes. Els desavantatges són la lentitud d'assecat, el requeriment de propietats específiques de tinta com ara baixa viscositat i alta tensió superficial i la dificultat de control de tots els paràmetres de processament.

#### 4.1.4. *Slot die* (Impressió per boca de ranura)

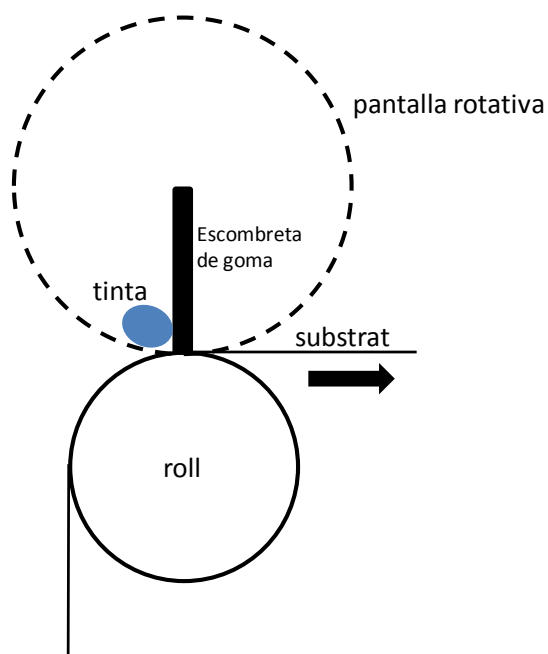
Aquesta tècnica fa ús d'un capçal d'impressió d'acer inoxidable amb una ranura a través de la qual la tinta, provinent d'una bomba o sistema de pressió, es diposita a sobre del substrat mòbil. El gruix de la pel·lícula resultant queda determinat per la velocitat a què es mou el substrat i la velocitat a què es proporciona la tinta. El mètode de recobriment per boca de ranura és compatible amb el R2R i pot assolir velocitats de substrat de diversos  $\text{m min}^{-1}$ , de manera que és apropiat per a impressions d'àrees grans i processos escalats. Addicionalment, permet aconseguir un patró en forma de línies (1D) de manera directa quan s'usen màscares amb àrees lliures a través de les quals pot fluir la tinta. El gruix de la màscara és una característica essencial i oscil·la típicament entre els 20 i els 50  $\mu\text{m}$  per a les tintes de baixa viscositat utilitzades normalment per a les cèl·lules solars orgàniques.



**Figura 4.2:** Slot die

#### 4.1.5. *Screen printing* (Impressió per pantalla rotativa)

S'utilitza una pantalla tèxtil prèviament coberta per una emulsió curada per llum ultraviolada, excepte en les zones en què s'ha de fer el patronatge que es deixen obertes. Una quantitat específica de pasta es col·loca en la pantalla, que se situa pròxima al substrat, i subseqüentment una escombreta de goma s'utilitza per filtrar-la a través d'aquesta perquè es dipositi al substrat. Aquesta tècnica permet fer patrons en 2D, la pèrdua de material és mínima i, a més, és compatible amb R2R si la pantalla es modela com un cilindre amb l'escombreta de goma al seu interior i el substrat és fet passar per sobre d'un rotlló en contacte amb la pantalla rotativa (veure figura 4.3). Quant a les pastes utilitzades, són més barates que aquelles de la impressió *inkjet*. El principal inconvenient és que les viscositats de les tintes han de ser elevades, de l'ordre de Pa·s (normalment entre 3 i 20) i, per tant, és difícil imprimir materials de capa activa orgànica comuns tals com P3HT, PCBM i ZnO, que tenen viscositats més petites. No obstant això, és una tècnica apropiada per a la impressió de PEDOT:PSS i plata, fet pel qual s'acostuma a utilitzar com a complementària a altres processos compatibles amb R2R per a la deposició d'aquestes capes [6].



**Figura 4.3:** Screen printing adaptada a R2R.

Els següents apartats se centren en els procediments per a la producció a gran escala de mòduls fotovoltaics d'interès (silici cristal·lí i orgànics semitransparents).

## 4.2. Fabricació dels mòduls fotovoltaics inorgànics de silici cristal·lí

El procés de manufactura de mòduls o plaques fotovoltaïques basades en *wafers* de silici cristal·lí comprèn quatre fases:

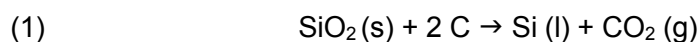
1. Producció del polisilici
2. Producció dels lingots i *wafers*
3. Producció de les cèl·lules
4. Assemblatge dels mòduls

Com s'ha vist en l'apartat anterior, l'estructura d'una cèl·lula fotovoltaica de silici cristal·lí està formada per un *wafers* de silici i dos contactes, un posterior i un frontal. A continuació s'explica el procediment convencional per a la producció d'aquestes cèl·lules a partir de l'extracció de la matèria primera.

- Tractament de la matèria primera

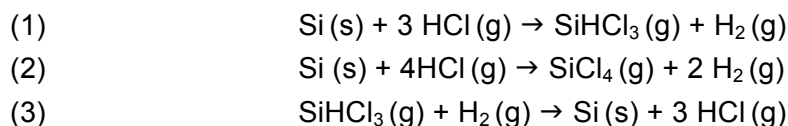
El silici és el segon element més abundant de l'escorça terrestre (aproximadament en un 26%) però no es troba en la seva forma elemental sinó com a diòxid de silici ( $\text{SiO}_2$ ) en sorra, roca i quars. Per a aplicacions de fotovoltaica, el silici ha de tenir una puresa determinada que s'assoleix en els següents dos passos:

- Producció de silici metal·lúrgic (MG-Si) a partir de la matèria primera mitjançant la reducció del diòxid de silici en silici fos (metall) i  $\text{CO}_2$ . Aquest procediment normalment es realitza en forns d'arc elèctric a temperatures molt altes (de 1400 a 2000°C), on la matèria primera (habitualment quars) reacciona amb un agent reductor basat en carboni, com ara carbó o coc. El silici resultant té una puresa del 98 al 99%. La reacció carbotèrmica bàsica que es produeix a dins del forn és la següent:



- Purificació del silici metal·lúrgic per obtenir silici de grau solar (SoG) de puresa 99,9999%. Actualment el procés Siemens modificat és el procediment químic més utilitzat per a la producció de silici de grau solar comercial i consisteix en la descomposició tèrmica de gas triclorosilà ( $\text{SiHCl}_3$ ), produït prèviament mitjançant la barreja de clorur d'hidrogen i silici metal·lúrgic en pols. Aquest procés es produeix a dins d'un reactor Siemens amb temperatures que arriben as 1100°C per a la fase de descomposició del triclorosilà. Les principals reaccions que hi tenen lloc són les següents:





- Fabricació dels *wafers*

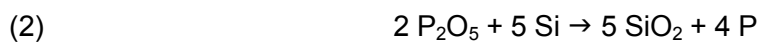
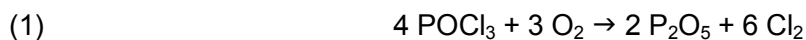
Quant al *wafers*, depenent de si és silici monocristal·lí o policristal·lí es produirà d'una manera diferent ja que el procediment per a obtenir l'estructura cristal·lina és diferent per als dos casos. En resum:

- Els *wafers* monocristal·lins consisteixen en silici amb una única i contínua estructura cristal·lina que es fa créixer a partir d'un petit cristall de sembra extret lentament d'una fusió de silici d'alta puresa o polisilici amb impureses de bor formant un lingot amb forma cilíndrica (procés Czochralski). A continuació, aquest lingot es talla en *wafers* mitjançant una serra de diamant. El silici residual pot ser reciclat en polisilici.
- Els *wafers* policristal·lins, a base de silici policristal·lí format per grans de silici monocristal·lí, s'obtenen per colada del polisilici fos, obtinguda a partir de l'extracció del cristall de sembra a més velocitat que en el cas de voler obtenir monocristalls, i es forma un lingot en forma de cub, que després és serrat similarmet al cas anterior per a obtenir els *wafers*.
- Tractaments superficials i texturització

Els *wafers* són el principal input de la cadena de producció d'una cèl·lula fotovoltaica de silici cristal·lí. En entrar a la cadena, en piles, han de ser revisats per a detectar possibles micro-esquerdes, defectes de tall o encenalls del procés de fabricació. En la majoria de casos es realitzen un conjunt de processos per a millorar les condicions superficials dels *wafers*, com ara una neteja preliminar, eliminació de defectes per ultrasons, polit o neteja amb productes químics. A fi de millorar l'absorció de la llum, és habitual dur a terme una texturització de la superfície dels *wafers*, que depèn del tipus de cristall i es realitza en tancs químics. Per a obtenir la típica textura piramidal aleatòria del silici monocristal·lí, els *wafers* se submergeixen en hidròxid de potassi (KOH) aquós a 70-80°C durant 20-30 minuts. Per al silici policristal·lí, la texturització s'efectua en presència d'agents acídics com una mescla d'aigua desionitzada, àcid nítric (HNO<sub>3</sub>) i fluorur d'hidrogen (HF) durant 1-2 minuts a una temperatura de procés de 10-15°C. Al contrari que en el silici monocristal·lí, els baixos valors de temperatura i temps d'aquesta texturització permeten l'ús de bancs de treball en línia. Com que aquest pas es realitza en presència de dissolucions, els *wafers* han d'assecar-se abans de poder avançar en el procés productiu.

- Difusió de fòsfor per a la creació de la unió p-n

Un cop els *wafers* han estat netejats, texturitzats i assecats, s'ha de crear la unió p-n mitjançant la difusió de fòsfor. Aquesta etapa es realitza en forns de difusió, a una temperatura al voltant de 850°C i on s'introdueixen els *wafers* a dins d'un tub de quars, disposats alhora en un suport de quars. Com a font d'impureses s'utilitza normalment el dopant comercial oxicleur de fòsfor líquid (POCl<sub>3</sub>) subministrat com a flux gasós a l'interior de la càmera mitjançant un gas inert, típicament nitrogen, que actua com a gas portador. Les reaccions que es produeixen són les següents:



Com es pot veure a (1) el corrent gasós de l'espècie dopant reacciona amb l'oxigen present en la mescla gasosa i forma l'òxid de fòsfor P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, que es diposita sobre la superfície de silici. El clorur que resulta funciona com a agent eliminador d'impureses metàl·liques i, per tant, la seva presència és beneficiosa. La deposició de l'òxid de fòsfor sobre el silici origina una reacció entre els dos components (2) que dona lloc a la formació d'àtoms de fòsfor que es difonen cap al volum del semiconductor. El cicle acostuma a tenir una durada d'una hora [3].

El nombre de làmines processades simultàniament i la seva disposició geomètrica a l'interior del tub de quars determinen la velocitat i la uniformitat en la composició del flux gasós que transporta l'espècie dopant des de la font dopant fins les làmines.

- Neteja en humit de l'òxid produït en la difusió

L'exposició dels *wafers* de silici a una atmosfera de POCl<sub>3</sub>, O<sub>2</sub> i N<sub>2</sub> provoca el creixement d'un vidre de silicat de fòsfor (PSG) a la superfície i que és una mescla de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> i SiO<sub>2</sub>. Aquest vidre augmenta de gruix (fins a desenes de nanòmetres) mentre hi ha el corrent de POCl<sub>3</sub> i posteriorment a la difusió del fòsfor ha de ser eliminat mitjançant un procés de gravat químic en mullat amb àcid fluorhídric.

- Deposició de la capa antireflectant

La capa de nitrur de silici amorf hidrogenat (a-SiN<sub>x</sub>:H) que actua com a antireflectant és dipositada al buit sobre la superfície frontal del *wafers* mitjançant una tecnologia de deposició de vapor químic millorada per plasma (PECVD o *Plasma Enhanced Chemical Vapour Deposition*) basada en silà (SiH<sub>4</sub>) i amoníac (NH<sub>3</sub>).

- Definició dels contactes

Els contactes metàl·lics frontals i posteriors s'imprimeixen a partir de pastes metàl·liques i

mitjançant la tècnica del *screen printing*, que consisteix en aplicar, aplicant pressió amb una escombreta de goma, la pasta sobre un substrat, en aquest cas les superfícies dels *wafers*, a través de les obertures d'una pantalla tèxtil. La impressió dels dos contactes es realitza de manera successiva com, per exemple, primer el contacte posterior d'alumini i, després, el contacte frontal a mode de patró. Les pastes utilitzades són de plata, per al contacte frontal, i d'alumini, per al posterior. Aquestes pastes estan composades de partícules metàl·liques de no més de 10  $\mu\text{m}$ , per evitar que les obertures de la pantalla tèxtil s'obstrueixin, i dissolvents per millorar la capacitat d'impressió. Aquestes pastes s'han d'assecar un cop impreses per separar-ne els dissolvents a fi que puguin mantenir la forma i consistència determinada. El procés d'assecat es realitza normalment a 200°C.

- Formació dels contactes

Els *wafers* amb els contactes impresos passen seguidament a sotmetre's a tractaments tèrmics a dins d'un forn de radiació infraroja de cinta transportadora. En primer lloc, els components orgànics afegits durant el procés d'impressió amb una temperatura d'ebullició baixa són eliminats durant l'ascens de la temperatura. En segon lloc, els components orgànics restants són cremats en una atmosfera d'oxigen a 400°C. Per últim, els *wafers* es porten a 800°C durant uns segons i són refredats immediatament després. Durant aquesta última etapa es formen els contactes, tant frontal com posterior, entre el metall i el silici, de manera que aquests poden absorbir i transmetre l'energia generada per la unió p-n a causa de la irradiació solar. En aquest moment, el *wafer* ja és una cèl·lula solar de la qual es pot extreure energia.

- Aïllament de les vores

Aquest darrer pas és essencialment per millorar el rendiment de la cèl·lula i consisteix en eliminar el contacte que es produeix a la vora de la cèl·lula entre l'emissor (capa de silici de tipus N) amb el contacte posterior d'alumini. Aquest contacte origina un camí alternatiu per al flux de corrent fotogenerat, que pot anar de la part frontal a la posterior de la cèl·lula sense passar pel circuit exterior, i per tant, sense contribuir a la generació de potència elèctrica. Això fa que el circuit de la cèl·lula presenti una baixa resistència en paral·lel ( $R_p$ ) i, per tant, un factor d'ompliment menor. Per evitar-ho, s'utilitza una tecnologia de làser ultraviolat per a realitzar una ablació de l'àrea conflictiva de la vora, de manera que s'elimina la capa conductora de tipus N a les zones immediates a les vores.

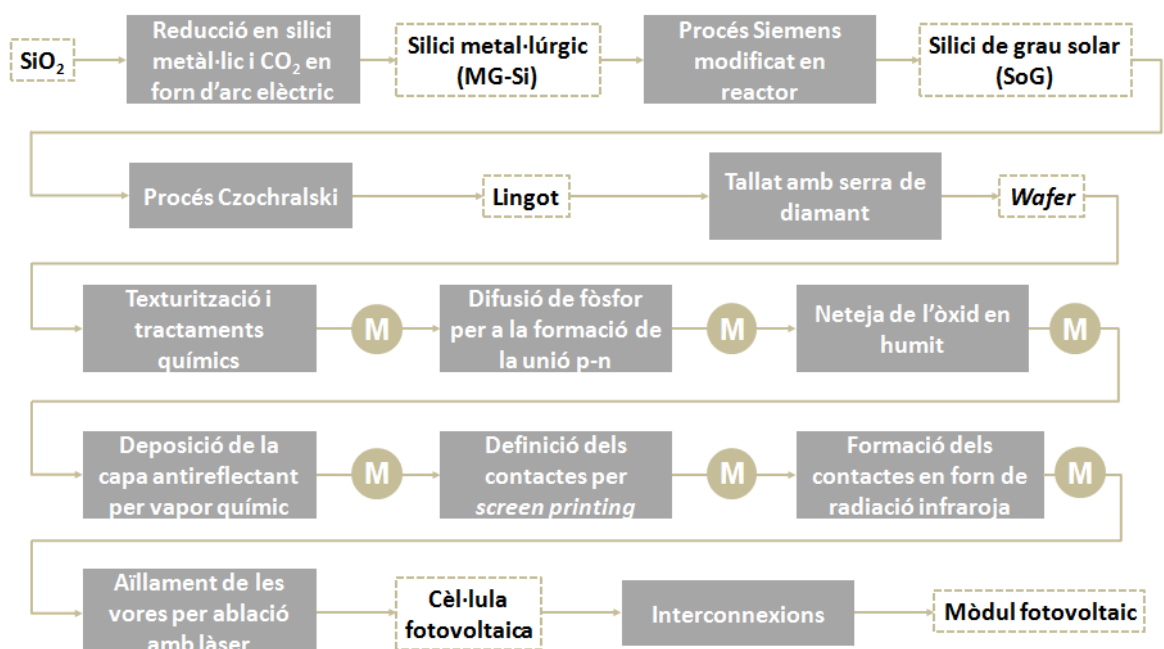
- Interconnexions

A fi de crear mòduls fotovoltaics que puguin satisfer les necessitats energètiques reals, cal establir una connexió eficient entre les diferents subcèl·lules que l'han de formar. Per tant, s'entén mòdul fotovoltaic com el conjunt de cèl·lules fotovoltaïques connectades en paral·lel (terminals positius amb positius i terminals negatius amb negatius) per obtenir un augment

en corrent i en sèrie (terminals positius amb negatius) per assolir una tensió més elevada. Els mòduls són subseqüentment encapsulats en vidre.

Hi ha dos aspectes que s'han de tenir en compte a l'hora de triar la millor manera per connectar les diferents cèl·lules per formar mòduls. En primer lloc, la resistència de contacte de les interconnexions ha de ser prou baixa per facilitar una eficient recombinació de les càrregues. En segon lloc, l'àrea morta resultant de les interconnexions, que no contribueix a la generació de corrent, s'ha de minimitzar, de manera que es disposi d'una àrea activa total més gran per a un rendiment més elevat del conjunt.

En el cas dels mòduls fotovoltaics de silici, el mode més utilitzat per a realitzar aquestes interconnexions és mitjançant *busbars* metàl·lics que recullen les càrregues dels diversos contactes de *finger*.



**Figura 4.4:** Diagrama de flux del procés de producció dels mòduls fotovoltaics de silici cristal·lí. Les *M* indicades entre els passos indiquen que es produeix una manipulació del producte per a passar d'un pas a l'altre.

#### 4.3. Producció dels mòduls fotovoltaics orgànics semitransparents

En la següent descripció del procés de fabricació del mòdul solar orgànic semitransparent es considera una estructura invertida ITO o AgNW/ZnO/P3HT:PCBM/PEDOT:PSS/AgNW.

- Preparació de l'elèctrode inferior

En el cas d'utilitzar el conductor transparent ITO, es disposa sobre el substrat de PET cobert amb ITO (disponible en el mercat) amb el patró desitjat mitjançant la tècnica de screen printing usant una tinta resistent al gravat i curable amb irradiació ultraviolada. Es realitza un curat sota una llum de curat ultraviolada per protegir l'ITO que no ha de ser gravat i successivament es realitza la tècnica de gravat a l'aiguafort amb clorur de coure aquós per obtenir el patró de l'elèctrode.

Si l'elèctrode inferior és a base de nanocables de plata, aquests són recoberts sobre el substrat mitjançant la tècnica de *slot die*. Posteriorment, s'utilitza un làser per fer un patró en l'elèctrode (P1), eliminant material de la capa de nanocables de plata en les posicions desitjades per tal d'establir connexions amb les capes posteriors.

- Deposició de la capa transportadora d'electrons

El substrat és recobert mitjançant la tècnica del *slot die* amb una dissolució de nanopartícules d'òxid de zinc (ZnO). Les nanopartícules són produïdes per la cremació de sals metàl·liques dissoltes en solvents orgànics i la solució o tinta s'obté dispersant aquestes nanopartícules en isopropanol.

- Deposició de la capa activa

La capa activa també és dipositada mitjançant la tècnica de *slot die*, a partir d'una tinta comercial preparada amb P3HT i PCBM (amb un rati de 10:9) dissolts en cloro benzè a 120°C durant tres hores.

- Deposició de la capa transportadora de forats

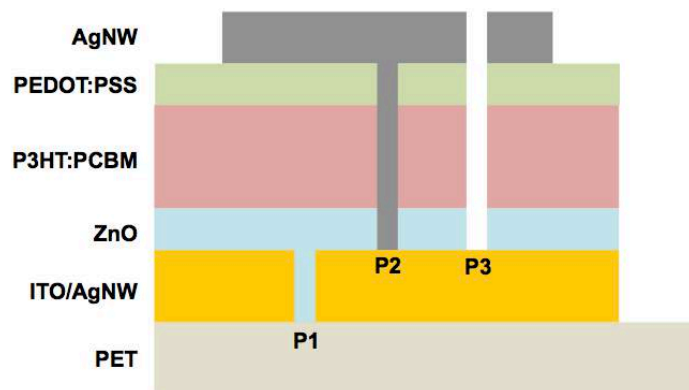
La tinta utilitzada en aquest cas és a base de PEDOT:PSS lentament dissolt en isopropanol i s'aplica fent ús de la tècnica *slot die*. Els mòduls són rentats prèviament al recobriment amb isopropanol per a obtenir una pel·lícula més homogènia i una millor interfície entre la capa activa i la capa de PEDOT:PSS.

- Aplicació de làser per crear línia patró en les capes semiconductores

El raig làser produeix l'ablació selectiva de les capes semiconductores (capa transportadora de forats, capa activa i capa transportadora d'electrons) per tal d'establir contacte entre els elèctrodes inferior i superior (P2), gràcies al qual s'aconsegueix la connexió en sèrie amb les cèl·lules adjacents. En aquest procediment s'ha de tenir un control absolut dels paràmetres del raig utilitzat per evitar el dany a l'elèctrode i substrat inferior.

- Deposició de l'elèctrode superior

Els nanocables de plata que constitueixen l'elèctrode superior s'apliquen mitjançant *slot die* i s'assequen en un forn a 130°C. Per establir una separació elèctrica entre els dos elèctrodes, es crea una tercera línia de patró (P3) que perfora totes les capes fins arribar a la capa d'ITO o nanocables de plata de l'elèctrode inferior.



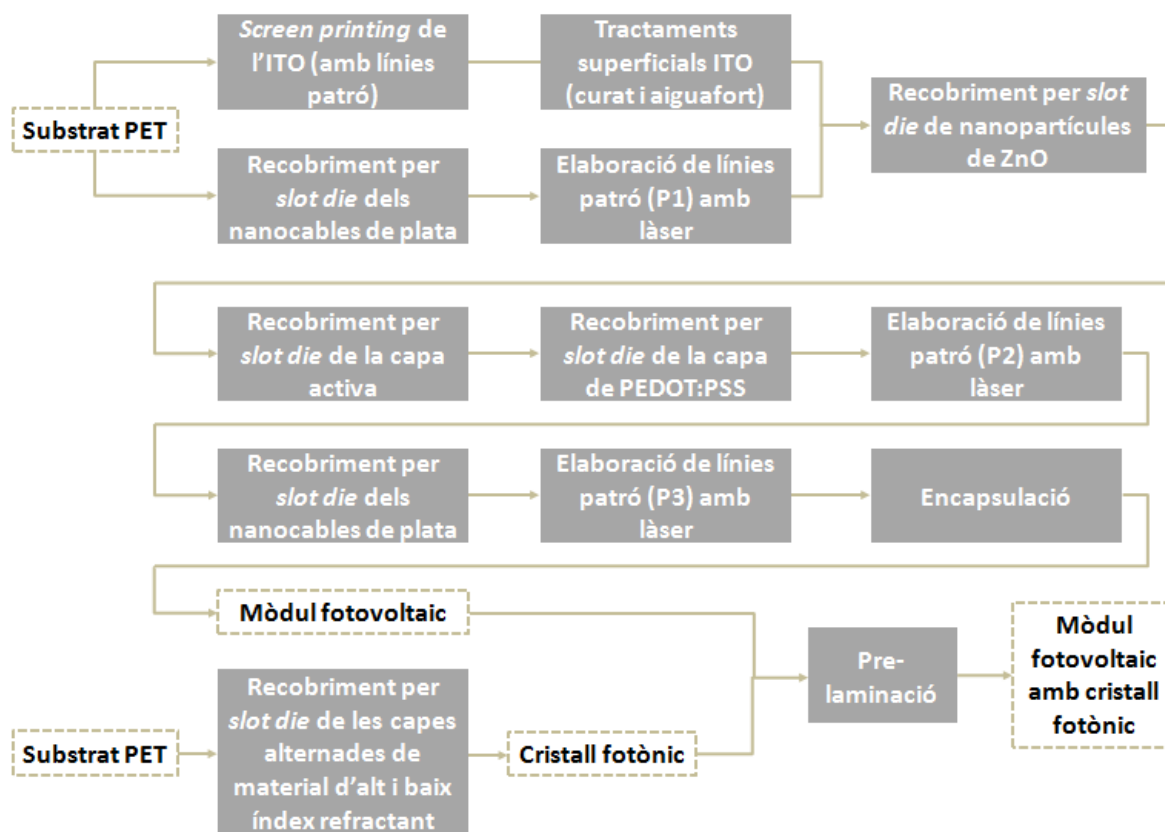
**Figura 4.5:** Esquema de les línies patró realitzades amb raig làser per a les interconnexions de la cèl·lula fotovoltaica.

- Encapsulació del mòdul fotovoltaic

A fi de protegir els mòduls de la laminació amb el cristall, procés que es realitza a una temperatura elevada que depèn del tipus de vidre utilitzat, aquests són encapsulats amb una resina prèviament adherida a una làmina de PET pels dos costats del mòdul. En aquest cas, s'utilitza la resina epoxídica DELO-KATIOBOND, que és un adhesiu fotopolimeritzable i curable amb radiació ultraviolada.

- Fabricació del cristall fotònic

Les capes de material d'alt i baix índex refractant que formen el cristall fotònic són aplicades alternadament sobre un substrat de PET mitjançant *slot die*. S'apliquen cinc capes de cada material, començant pel que té l'índex de refracció baix i acabant amb el que té l'índex de refracció alt. Per a poder fer servir aquest mètode de recobriment, els components químics requerits,  $\text{TiO}_2$  i  $\text{SiO}_2$ , es mesclen amb l'èter dissolvent 2-propoxietanol i aigua, respectivament, junt amb agents dispersants orgànics, per a obtenir unes tintes amb les característiques adequades.



**Figura 4.6:** Diagrama de flux del procés de producció dels mòduls fotovoltaics orgànics semitransparents.

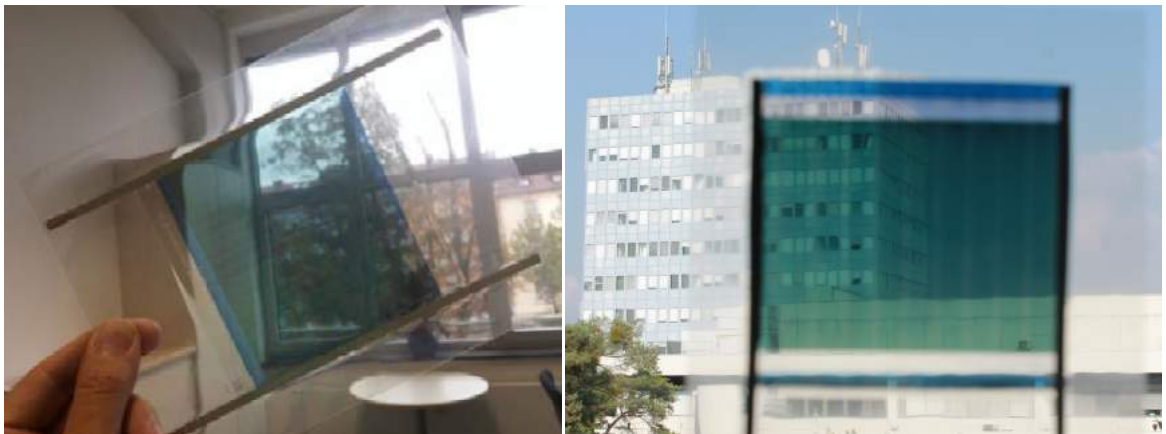
## 5. Avaluació comparativa dels mòduls fotovoltaics orgànics semitransparents

Per tal d'estudiar el comportament dels mòduls fotovoltaics orgànics estudiats en aquest treball, entre els mesos d'agost i novembre de 2016 se n'ha realitzat una avaluació comparativa o *benchmarking* a Lleida. L'avaluació comparativa s'ha fet amb dues tecnologies de fotovoltaica orgànica que ja hi ha al mercat. Així, en l'estudi del *benchmarking* es parla de tecnologia A per referir-se als mòduls nous, amb els materials i la tecnologia de producció indicades en l'apartat 4.3. d'aquest treball i tecnologies B i C per referir-se als mòduls comercials.

Els mòduls de la tecnologia A s'han fabricat per a que tinguin aquestes característiques:

- Dimensions: **105 x 105 mm**
- Voltatge: **10 V**
- Amperatge: **0.02 A**
- Potència: **0.20 W**

Cada mòdul està format per 19 cèl·lules. Aquestes es poden observar en la imatge presentada a continuació.



**Figura 5.1:** Prototip de mòdul fotovoltaic orgànic semitransparent de la tecnologia A.

### 5.1. Condicions del *benchmarking*

El *benchmarking* s'ha efectuat instal·lant els mòduls en una unitat de prova a l'aire lliure, amb les condicions pròpies d'una façana d'edifici i orientats cap al sud. La unitat de prova utilitzada ha estat una caseta de fusta de dimensions 2,5m x 2,5m. Com que les geometries de cada tecnologia són diferents, s'han utilitzat perfils extruïts d'alumini adaptats a cada una d'elles. Addicionalment, degut a la flexibilitat dels mòduls estudiats, aquests s'han arranjat en



una estructura de doble vidre per mantenir-los totalment plans i emular encara més la integració en una façana de vidre.



**Figura 5.2:** Unitat de prova en què s'ha realitzat el benchmarking.

Pel que fa als dispositius de mesura, els utilitzats han estat els següents:

- Piranòmetre (Kipp & Zonen CMP6), al centre de cada un dels mòduls per registrar la irradiació global rebuda.
- Termoparell de tipus T, al darrere de cada mòdul per mesurar la temperatura.
- Seguidors del punt de màxima potència (MPPT), a l'interior de la unitat de prova.
- Sistema d'adquisició de dades (Campbell Sci.) a l'interior de la unitat de prova.
- Traçador I-V (Keithley 2460), a l'interior de la unitat de prova.

Cal destacar que els MPPT utilitzats han hagut de ser dissenyats especialment per aquest experiment, ja que el rang de tensions i corrents dels mòduls amb què ha de treballar és massa petit pels models comercialitzats. El circuit electrònic dissenyat permet, a més, adquirir informació en qualsevol interval de temps i també canvia automàticament per a mesurar la corba I-V en diversos moments del dia.

Les mesures han estat realitzades en laboratori (per a les de transmitància) i a l'aire lliure (les elèctriques) per experts en la matèria de la Universitat de Lleida.

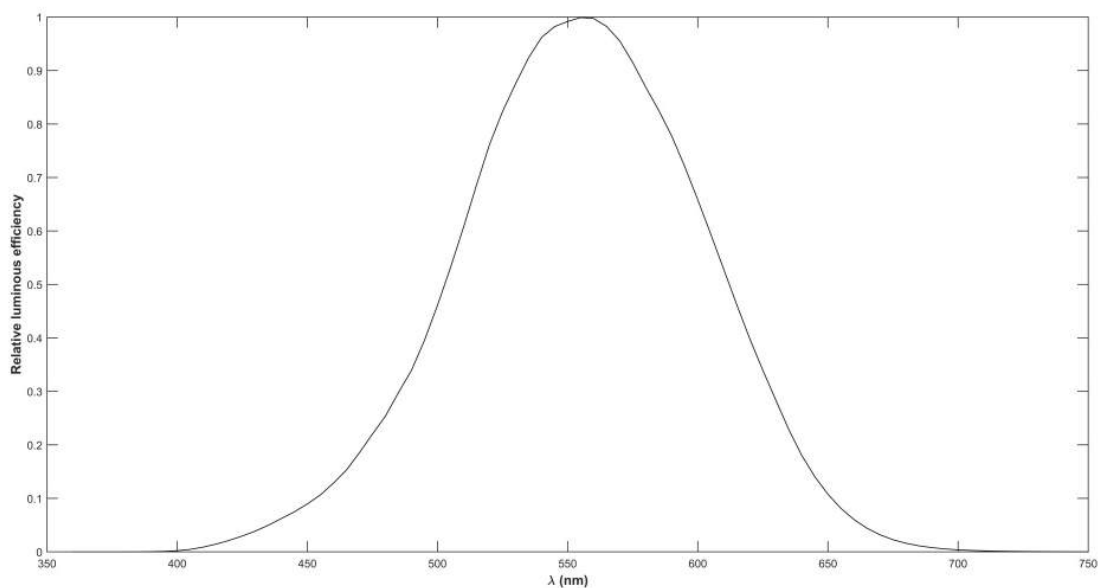
## 5.2. Caracterització dels mòduls

Prèviament a la presa de resultats, els mòduls s'han hagut de caracteritzar en termes de transmitància espectral i paràmetres elèctrics.

### 5.2.1. Transmitància espectral

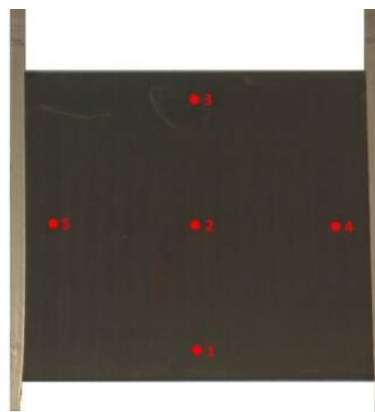
Una característica essencial que han de complir els mòduls fotovoltaics per a integrar-los en façanes d'edificis és la transparència, per tal de deixar passar llum alhora que es produeix

energia elèctrica. La transmitància espectral d'un element constructiu com ara una finestra es refereix al percentatge de radiació que pot travessar el vidre. Alhora, la transmissió de llum visible és la mesura de l'efectivitat amb què un tipus de vidre proporciona llum del dia i permet una clara visió a través d'aquest. L'ull humà és sensible a la llum per a longituds d'ona entre 0,4 i 0,7  $\mu\text{m}$  (rang fotòpic), amb un màxim de sensibilitat situat al voltant dels 0,55  $\mu\text{m}$  de longitud d'ona. Per tant, la transmissió del mòdul fotovoltaic hauria de ser intensificada en aquest rang de longituds d'ona per assegurar una visió adequada en els espais interiors.



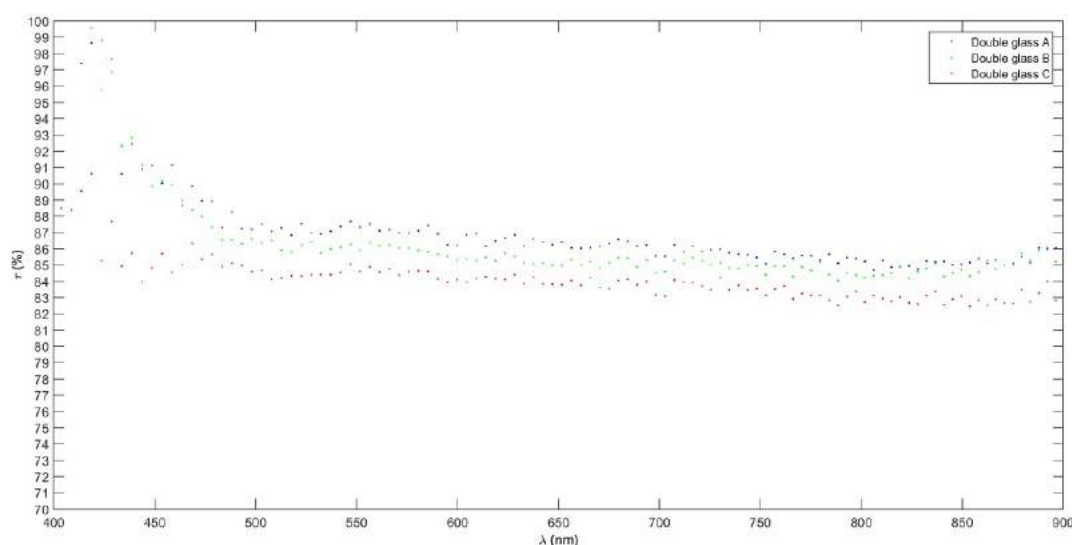
**Figura 5.3:** Corba de resposta, acordada internacionalment, per a la visió fotòpica d'un observador estàndard. A l'eix d'ordenades es troba l'eficiència lluminosa relativa i al de coordenades, les longituds d'ona.

Per a la transmitància espectral, s'han realitzat mesures periòdiques de cada mòdul fotovoltaic amb un espectròmetre (Ocean Optics) per a llum visible i gairebé infraroja (VIS-NIR) en cinc punts de la superfície del mòdul. La finalitat de tenir cinc punts de mostreig diferents en cada mòdul és poder determinar la homogeneïtat de la mescla orgànica. A més, obtenir les transmitàncies espectrals de cada un dels mòduls d'un tipus permet determinar la replicabilitat dels mòduls, que hauria de ser, previsiblement, major en el cas dels mòduls comercials.



**Figura 5.4:** Punts de mostreig de la tecnologia A per mesurar la transmitància espectral.

Ja que els mòduls es troben integrats en una estructura de doble vidre, la transmitància espectral dels mòduls que s'obindrà no és la mateixa que la que tindrien sense el suport, ja que el propi vidre també suposa una barrera per a la llum. Per conèixer la transmitància espectral del vidre, també se n'ha realitzat la mesura amb l'espectròmetre esmentat. Per al rang fotòpic s'han obtingut unes transmitàncies mitjanes de 86% aproximadament (veure figura 5.5).



**Figura 5.5:** Transmitàncies espectrals dels panells de doble vidre que contenen els mòduls A, B i C.

### 5.2.2. Característiques elèctriques dels mòduls

Tots els mòduls han estat caracteritzats elèctricament mitjançant un seguidor solar de dos eixos, amb els quals la superfície del mòdul sempre és manté perpendicular a la llum del sol. Pels mòduls del projecte (tecnologia A), s'han realitzat dues mesures per tal de comparar el seu comportament inicial amb el comportament després de 10 minuts d'exposició contínua a la irradiació (indicat en la següent taula com +10), i així poder quantificar l'efecte *light-soaking*. Els paràmetres elèctrics determinats són la densitat de corrent de curtcircuit ( $J_{sc}$ ), el

potencial de circuit obert ( $V_{oc}$ ), el factor d'ompliment (FF) i l'eficiència ( $\eta$ ). Les condicions de medició per a cada mòdul també s'indiquen a la taula, i són la temperatura del mòdul (T) i la irradiació global (Glob).

**Taula 5.1:** Resum dels principals paràmetres elèctrics dels mòduls caracteritzats

TECNOLOGIA		CONDICIONS		PARÀMETRES ELÈCTRICS			
		T (°C)	Glob (W/m <sup>2</sup> )	J <sub>sc</sub> (mA/cm <sup>2</sup> )	V <sub>oc</sub> (V)	FF (%)	η (%)
A	A1	30,24	1007	0,26	12,78	39,63	1,32
	A1 (+10)	39,01	1006	0,27	13,27	45,08	1,59
	A2	30,47	1007	0,22	12,04	30,34	0,78
	A2 (+10)	41,70	1005	0,23	12,29	35,06	0,97
	A3	32,37	1010	0,26	12,04	39,26	1,22
	A3 (+10)	41,99	1009	0,26	12,29	42,31	1,36
B	B1	33,21	1003	0,97	8,00	50,79	3,94
	B2	29,08	1007	0,99	8,12	59,19	4,74
	B3	29,11	1007	1,00	7,59	57,57	4,33
C		30,93	1012	0,19	39,28	44,32	3,32

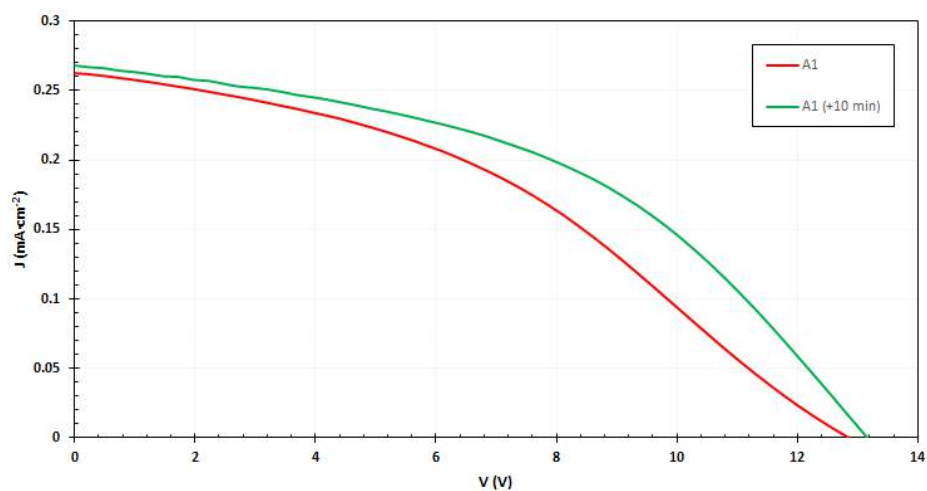
A la següent taula es mostren els paràmetres elèctrics dels mòduls comercials proveïts pel fabricant. Es pot observar una diferència important respecte dels paràmetres obtinguts durant la caracterització pel que fa al factor d'ompliment per als quatre mòduls i, sobretot, l'eficiència per al mòdul C. Aquest darrer cau a un valor de 3,32% respecte del 4,7% de valor de referència tot i mantenir-se gairebé constant quant a la densitat de corrent de curtcircuit i el voltatge de circuit obert, la qual cosa fa pensar en un augment de la resistència en sèrie del conjunt (veure apartat 2.4.3 referent a l'efecte de les resistències).

**Taula 5.2:** Resum dels paràmetres elèctrics dels mòduls comercials.

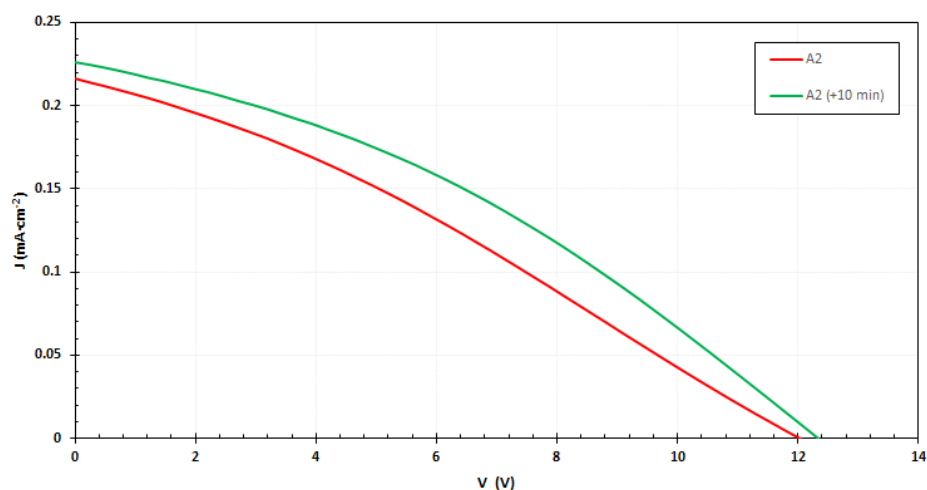
TECNOLOGIA		PARÀMETRES ELÈCTRICS				
		J <sub>sc</sub> (mA/cm <sup>2</sup> )	V <sub>oc</sub> (V)	FF (%)	P <sub>MPP</sub> (W)	η (%)
B	B1	0,92	7,8	60	0,11	4,4
	B2	0,86	7,8	64	0,11	4,4
	B3	0,88	7,8	62	0,11	4,3
C		0,21	40,71	51,8	2,65	4,7

Les següents gràfiques representen les corbes J-V resultants de les caracteritzacions elèctriques dels mòduls fotovoltaics. Per a la tecnologia A, s'expliciten dues corbes de colors diferents per a cada mòdul, vermell per al comportament inicial i verd per al comportament 10 minuts més tard.

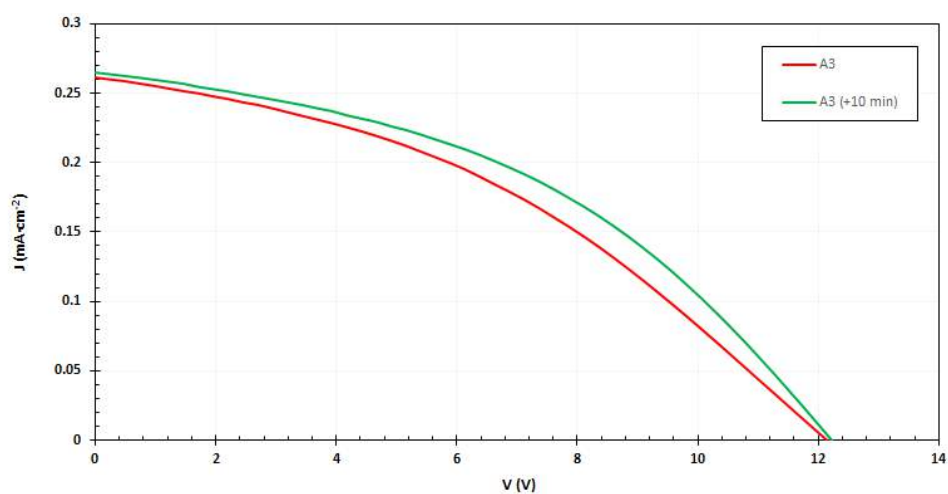
- Tecnologia A



**Figura 5.6:** Corba J-V del mòdul A1.

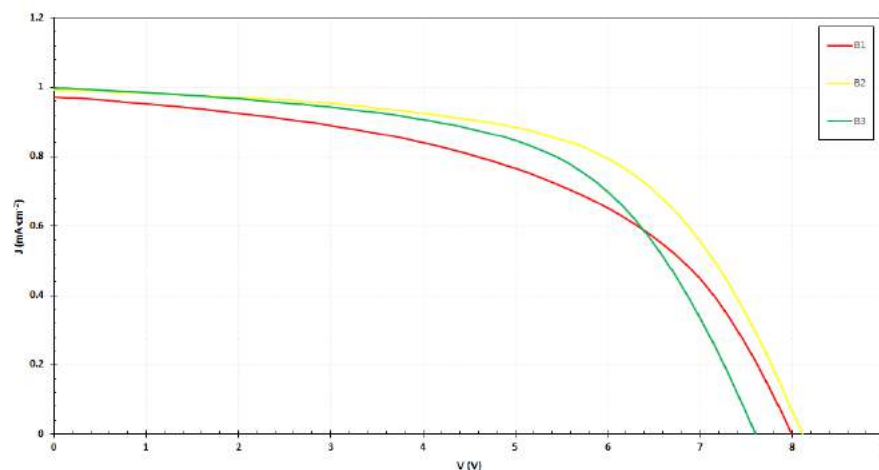


**Figura 5.7:** Corba J-V del mòdul A2.



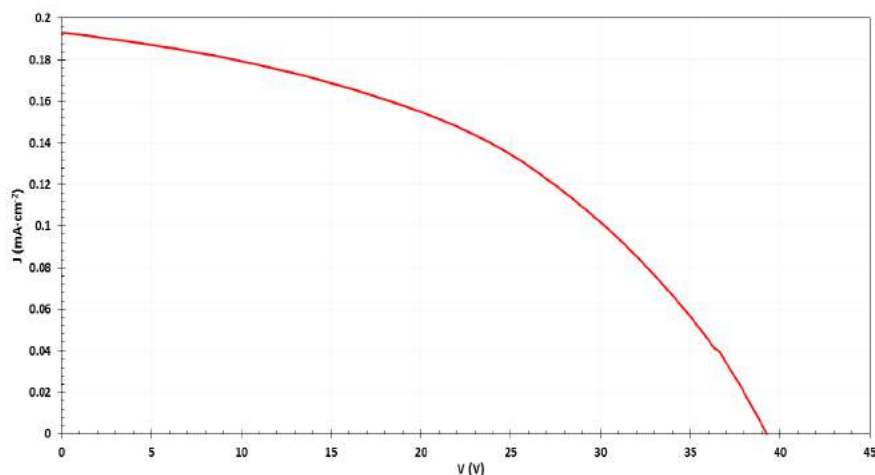
**Figura 5.8:** Corba J-V del mòdul A3.

- **Tecnologia B**



**Figura 5.9:** Corbes J-V dels mòduls B1 (vermella), B2 (groga) i B3 (verda).

- **Tecnologia C**



**Figura 5.10:** Corba J-V del mòdul C

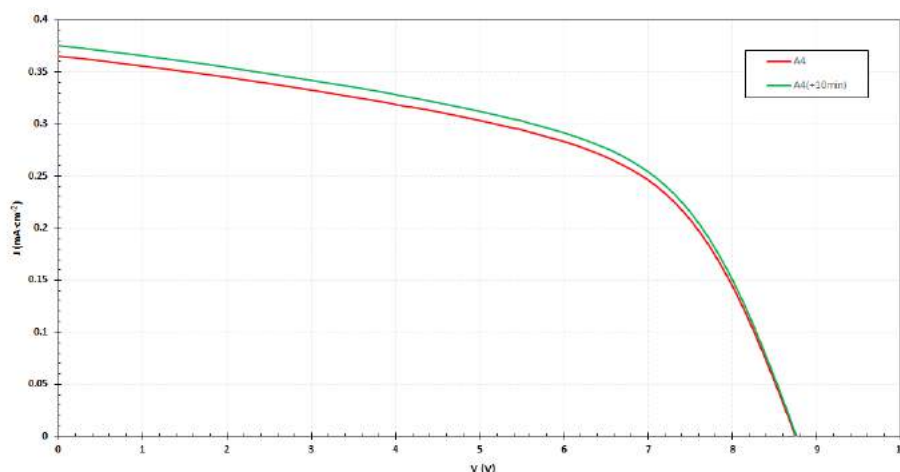
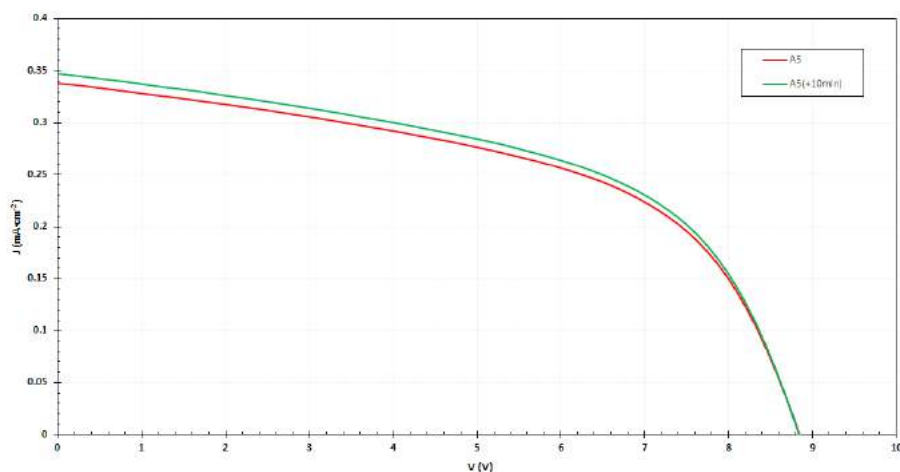
Tenint en compte la taula 5.1, els resultats d'eficiència (inferior a 2) i factor d'ompliment (al voltant del 40%, molts d'ells per sota) dels mòduls de la tecnologia A no van ser satisfactoris per l'abast del projecte i per això es van produir dos mòduls més que es van caracteritzar de la mateixa manera. Com que aquests mòduls, anomenats A4 i A5, no van arribar fins l'octubre, les condicions d'irradiació sota les quals es van caracteritzar van ser diferents. Els resultats de la caracterització s'aprecien a la taula següent.

**Taula 5.3:** Resum dels principals paràmetres elèctrics dels mòduls caracteritzats

TECNOLOGIA		CONDICIONS			PARÀMETRES ELÈCTRICS			
		T (°C)	Glob (W/m <sup>2</sup> )	Dir (W/m <sup>2</sup> )	J <sub>sc</sub> (mA/cm <sup>2</sup> )	V <sub>oc</sub> (V)	FF (%)	η (%)
A	A4	23,22	810	682	0,37	8,75	54,67	2,13
	A4 (+10)	24,54	834	705	0,38	8,75	54,82	2,14
	A5	21,21	783	672	0,34	8,84	52,92	1,99
	A5 (+10)	23,81	802	675	0,35	8,90	52,99	2,00

En el cas d'aquests dos nous mòduls A, els valors de factor d'ompliment són de l'ordre dels de les tecnologies comercials, mentre que els valors d'eficiència propers a 2 representen una millora respecte dels de la primera tongada de mòduls A.

Les corbes J-V corresponents a aquests mòduls es mostren a continuació. A simple vista ja es pot apreciar una forma més quadrada de les corbes, cosa que denota un factor d'ompliment més gran i, per tant, major eficiència.

**Figura 5.11:** Corba J-V del mòdul A4.**Figura 5.12:** Corba J-V del mòdul A5

### 5.3. Període de *benchmarking*

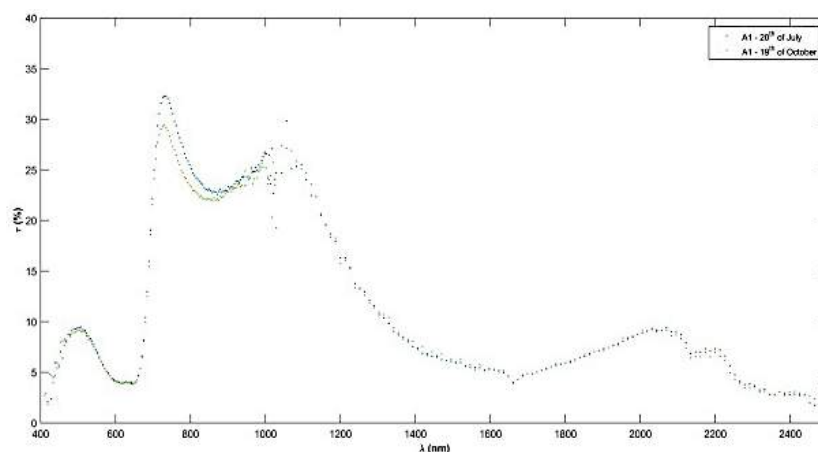
L'avaluació comparativa o *benchmarking* ha durat des del 29 de juliol de 2016 fins el 15 de novembre per al mòdul A1 i els mòduls B i C, des del 29 de juliol fins el 7 d'octubre per als mòduls A2 i A3 i des del 10 d'octubre fins el 5 de desembre per al segon lot de mòduls A (A4 i A5). Durant el període s'han realitzat les següents mesures:

- Quatre mesures de la transmitància espectral, consistents en agafar els mòduls un per un i procedir de la mateixa manera que durant la caracterització espectral per a obtenir un valor mitjà de la transparència del mòdul, amb i sense el doble vidre.
- Dues mesures diàries de la corba I-V. Del mòdul A1 es van prendre mesures 47 dies, mentre que dels mòduls A2 i A3 se'n van prendre 34 dies. Els mòduls B es van mesurar 48 dies i el C, 47. Quant als mòduls A4 i A5, se'n van prendre mesures 14 i 15 dies, respectivament. Cal destacar que les condicions meteorològiques de la ubicació del *benchmarking*, a Lleida, van fer que durant dues setmanes (l'última d'octubre i la primera de novembre) no es poguessin prendre mesures en absolut a causa de la boira.
- Mesura constant del punt de màxima potència mitjançant el dispositiu MPPT, el qual canviava automàticament a mesurar la corba I-V quan corresponia.

#### 5.3.1. Transmitància espectral

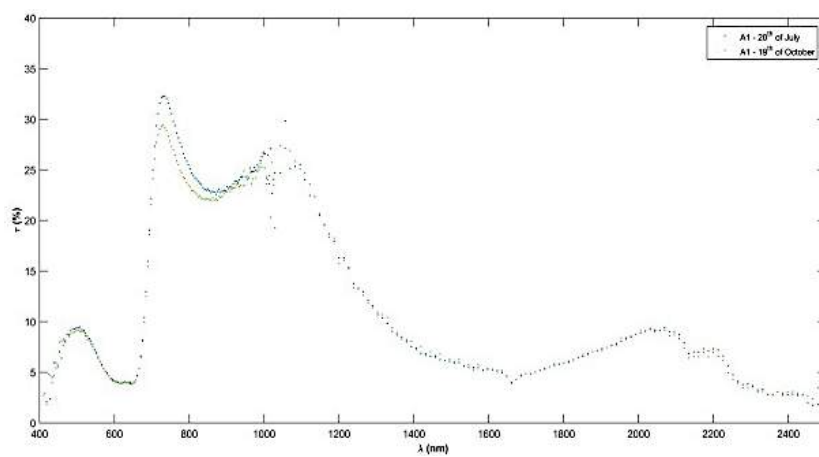
Les següents gràfiques corresponen als espectres de transmissió òptica mitjans per als diferents punts de mostratge dels diferents mòduls, prenent les mesures inicial i final.

- **Tecnologia A**

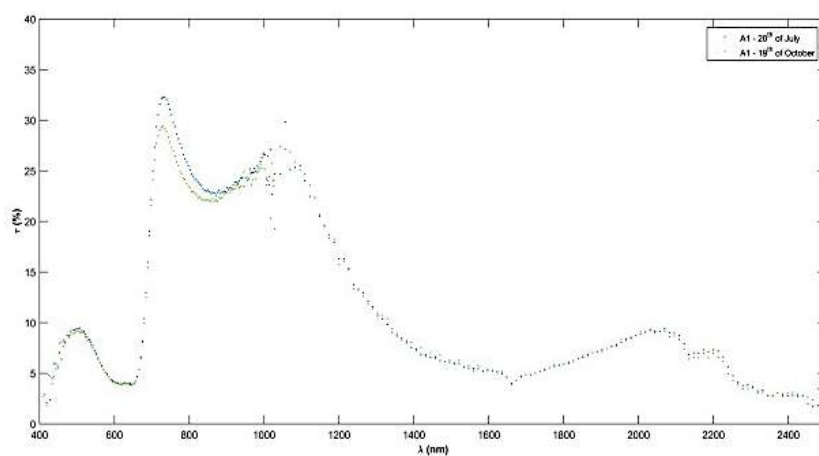


**Figura 5.13:** Espectre de transmissió òptica mitjana del mòdul A1.

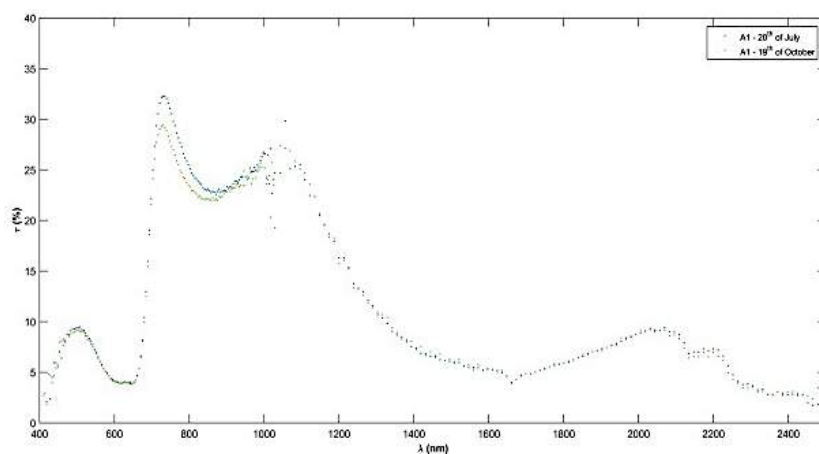




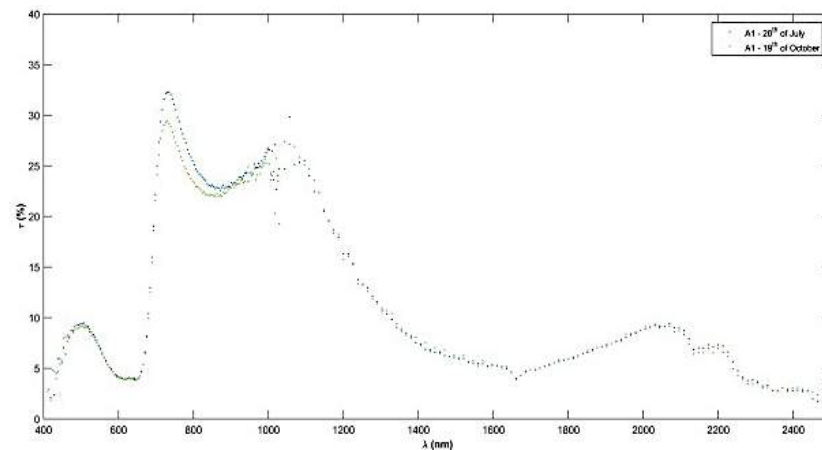
**Figura 5.14:** Espectre de transmissió òptica mitjana del mòdul A2.



**Figura 5.15:** Espectre de transmissió òptica mitjana del mòdul A3.



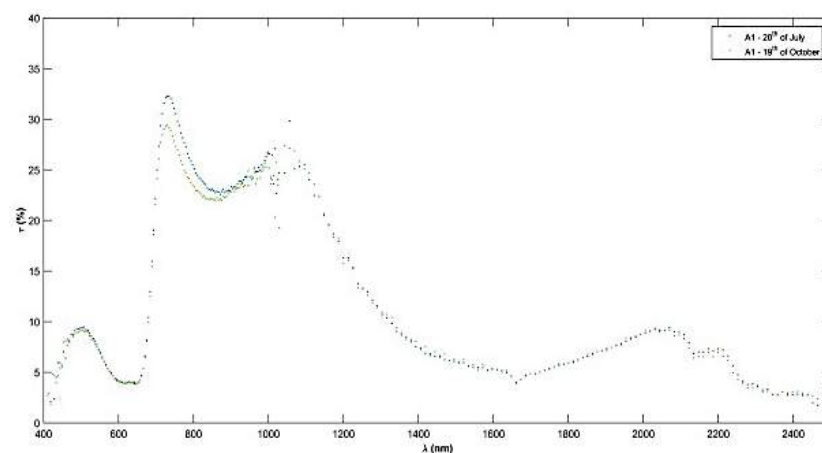
**Figura 5.16:** Espectre de transmissió òptica mitjana del mòdul B1.



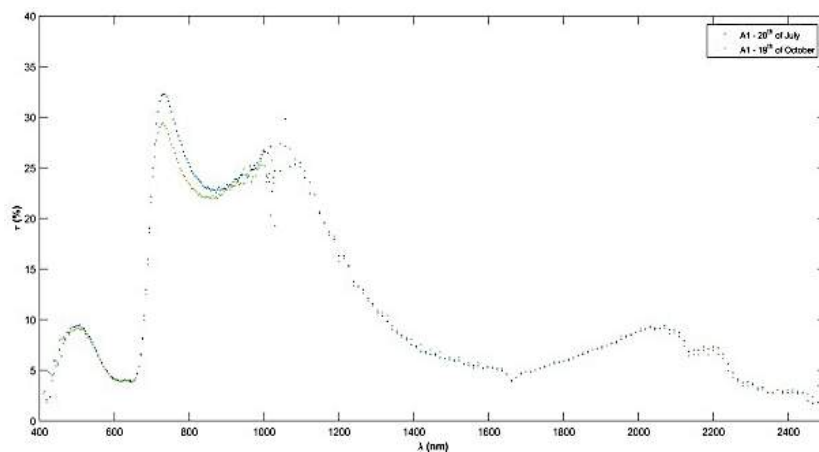
**Figura 5.17:** Espectre de transmissió òptica mitjana del mòdul A5.

Per a aquests mòduls es pot apreciar que tots menys l'A4 arriben al màxim de transmissió en valors de longitud d'ona propers a 800 nm, per tant, fora del rang fotòpic. Els mòduls del primer lot (A1, A2 i A3) presenten, a simple vista, uns valors més elevats que els de la segona tongada (A4 i A5). Pel que fa a la forma de la corba, els mòduls A1, A3 i A4 tenen un comportament similar, sobretot en el rang fotòpic, mentre que els espectres d'A2 i A4 presenten diferències, fet que es pot atribuir a la poca maduresa d'aquesta tecnologia. Convé destacar que l'espectre del mòdul A4 arriba a un màxim a fora del rang visible. En tots els casos s'aprecia soroll al voltant dels 1000 nm de longitud d'ona, tot i que com que no està inclòs dins del rang d'estudi no és un fet rellevant.

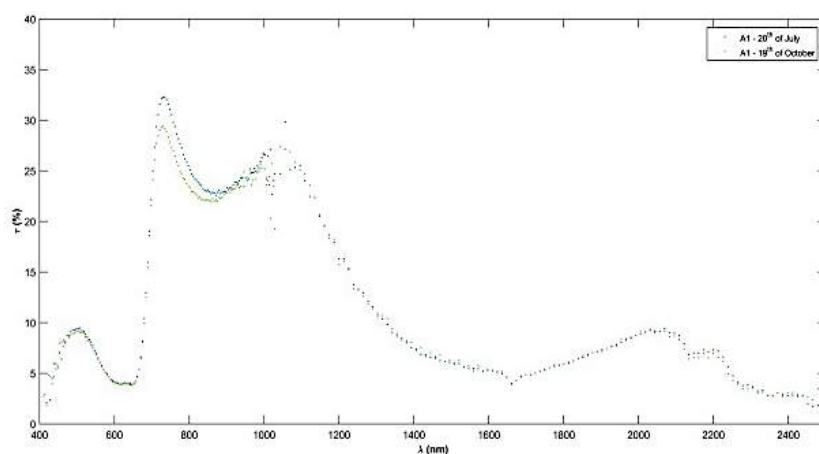
- **Tecnologia B**



**Figura 5.18:** Espectre de transmissió òptica mitjana del mòdul B1.



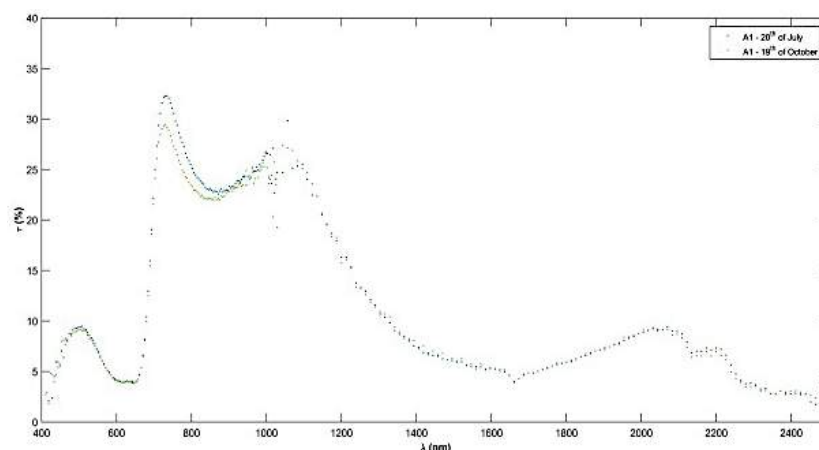
**Figura 5.19:** Espectre de transmissió òptica mitjana del mòdul B2.



**Figura 5.20:** Espectre de transmissió òptica mitjana del mòdul B3.

En els mòduls B s'observa una forma d'espectre similar per als tres mòduls estudiats per a tot el rang de longituds d'ona, tot i que l'espectre del mòdul B1 presenta uns valors màxims lleugerament més desplaçats cap a dalt. Un altre cop, s'observa la presència de soroll al voltant dels 1000 nm de longitud d'ona.

- **Tecnologia C**



**Figura 5.21:** Espectre de transmitància òptica mitjana del mòdul C.

L'espectre de transmissió òptica en aquest cas presenta el màxim a fora del rang visible. A més a més, es pot apreciar que en el rang d'estudi s'assoleixen valors inferiors als de les tecnologies anteriors.

- Resultats de transparència

Els valors mitjans inicials i finals de transmitància espectral òptica per a cada mòdul estudiat s'han calculat tenint en compte el rang fotòpic (400-700 nm) i també tot el rang visible (400-800 nm) ja que s'ha observat en tots els casos una millora de la transparència en valors propers als 800 nm de longitud d'ona. Per distingir entre les mesures amb i sense el doble vidre, s'ha utilitzat la notació  $\bar{\tau}$  (amb doble vidre) i  $\bar{\tau}'$  (sense doble vidre).

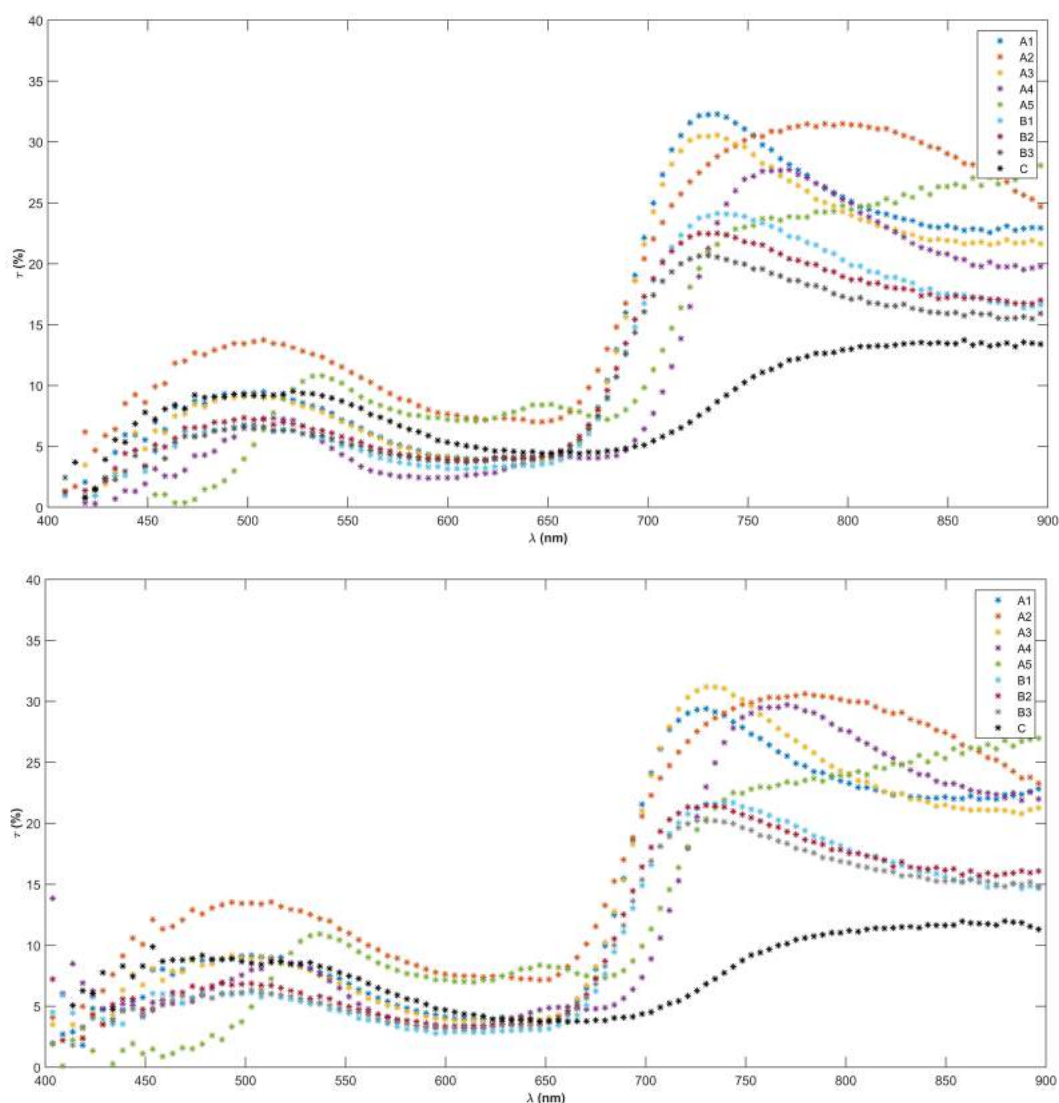
**Taula 5.4:** Valors de transparència espectral.

TECNOLOGIA		$\bar{\tau}_{i400-700}$ (%)	$\bar{\tau}'_{i400-700}$ (%)	$\bar{\tau}_{f400-700}$ (%)	$\bar{\tau}'_{f400-700}$ (%)	$\bar{\tau}_{i400-800}$ (%)	$\bar{\tau}'_{i400-800}$ (%)	$\bar{\tau}_{f400-800}$ (%)	$\bar{\tau}'_{f400-800}$ (%)
<b>A</b>	<b>A1</b>	6,6	7,6	6,7	7,8	16,3	18,8	15,5	18,0
	<b>A2</b>	9,9	11,4	10,2	11,8	19,6	22,7	19,7	22,9
	<b>A3</b>	6,5	7,5	6,82	7,9	15,7	18,1	16,1	18,6
	<b>A4</b>	4,6	5,4	5,6	6,4	11,1	12,8	13,8	15,9
	<b>A5</b>	5,6	6,5	6,13	7,1	12,7	14,7	13,1	15,1
<b>B</b>	<b>B1</b>	5,0	5,8	5,0	5,8	12,4	14,46	11,6	13,5
	<b>B2</b>	5,6	6,5	5,5	6,4	12,6	14,7	12,1	14,1
	<b>B3</b>	5,2	6,1	4,9	5,8	11,6	13,5	11,2	13,0
<b>C</b>		6,2	7,4	6,1	7,3	9,5	11,2	8,93	10,6

Tal i com es veu a la taula, les transparències de tots els mòduls presenten valors molt superiors quan es considera tot el rang visible. També, i com ja s'havia deduït anteriorment, els valors sense el doble vidre sempre són superiors als valors amb el doble vidre, que ja

per ell sol no presenta una transparència total, sinó d'un valor al voltant de 86%.

Pel que fa a la comparació entre els mòduls, es pot observar una clara superioritat del primer lot de mòduls A respecte de les altres tecnologies amb valors propers i fins i tot superiors, en el cas d'A2, a 20 en el rang visible. No obstant, en el segon lot s'observa una caiguda en transparència, que es veu compromesa amb l'augment d'eficiència i millora de paràmetres elèctrics d'aquests dos nous mòduls. De totes maneres, els valors finals de transparència d'A4 i A5 continuen sent notablement superiors als de les tecnologies comercials. En especial, la tecnologia C, presenta els valors de transparència més discrets, fet que ja es podia observar en la gràfica de l'espectre de transmissió òptica d'aquest mòdul. En les següents gràfiques es mostren els espectres de transmissió òptica inicial i final de tots els mòduls del *benchmarking*, on es poden observar i comparar els comportaments esmentats anteriorment.



**Figura 5.22:** Espectres de transmissió òptica a l'inici (gràfica superior) i al final (gràfica inferior) del període de benchmarking per a cada un dels mòduls analitzats.

Les formes dels espectres no exhibeixen grans canvis entre l'inici i el final del *benchmarking*, en especial per al rang fotòpic (400-700 nm), fet que també s'observa en els resultats de la taula 5.4 anterior. Fora del rang fotòpic sí que s'aprecia una reducció general dels valors de transparència, excepte per al mòdul A3, que fins i tot presenta un pic més gran al voltant dels 750 nm de longitud d'ona, i el mòdul C.

En termes de transparència, no es poden comparar els mòduls fotovoltaics orgànics amb els mòduls fotovoltaics de silici cristal·lí, ja que l'estructura d'aquests no permet la transmissió de la llum visible. Per això, tot i que queda fora de l'abast d'aquest treball, s'ha realitzat una comparació amb la tecnologia fotovoltaica de silici amorf que, degut a que és una tecnologia de pel·lícula fina pot assolir una certa transparència. Habitualment, una cèl·lula fotovoltaica de silici amorf està composta de cinc capes principals: un díode p-i-n de silici (semiconductor intrínsec no dopat situat entre una regió de tipus p i una regió de tipus n) i dos capes de conductor transparent, que actuen d'elèctrodes. Les capes es disposen uniformement mitjançant una deposició de vapor químic al buit i a unes temperatures de fabricació (de 200°C a 400°C) notablement més baixes que les utilitzades en la producció de mòduls de silici cristal·lí (veure apartat 4.2). Els mòduls tradicionals de silici amorf, però, no ofereixen una bona transparència, ja que s'acostuma a prioritzar una eficiència més elevada assolida amb gruixos de capa que no permeten una bona transmissió de la llum visible. Les principals aproximacions a la semitransparència han estat a base de fer obertures en el material, però això es tracta de semitransparència no uniforme i, per tant, s'ha decidit no tenir-la en compte en la comparació. No obstant això, sí que s'han trobat referències de mòduls fotovoltaics de silici amorf amb semitransparència uniforme que ja es comercialitzen, tal i com s'explicita en la següent taula.

**Taula 5.5:** Dades de transparència i eficiència de dues tecnologies fotovoltaiques comercials de silici amorf [11].

TECNOLOGIA	Transparència	Eficiència
<b>Schott</b>	10%	5,2%
<b>SunTech</b>	10%	4,5%

Es pot apreciar com l'eficiència d'aquests mòduls fotovoltaics és més baixa que la mitjana d'eficiència de la tecnologia fotovoltaica de silici amorf, degut a que el gruix de la capa absorbidora s'ha de reduir molt (típicament se situa en 1 µm per a un mòdul opac [11]). Els valors de transparència, però, no assoleixen els resultats obtinguts pels mòduls fotovoltaics orgànics analitzats.

### 5.3.2. Característiques elèctriques dels mòduls

- Resultats de paràmetres elèctrics

La següent taula resumeix els paràmetres elèctrics dels mòduls als moments inicials (i) i

finals (f) del període durant el qual s'ha dut a terme l'avaluació comparativa. Com que les condicions d'irradiació eren diferents per als dos instants de temps, s'han seleccionat les dades de cada un a partir del criteri de les irradiacions similars.

**Taula 5.6:** Resum dels paràmetres elèctrics al començament i al final del període de *benchmarking*

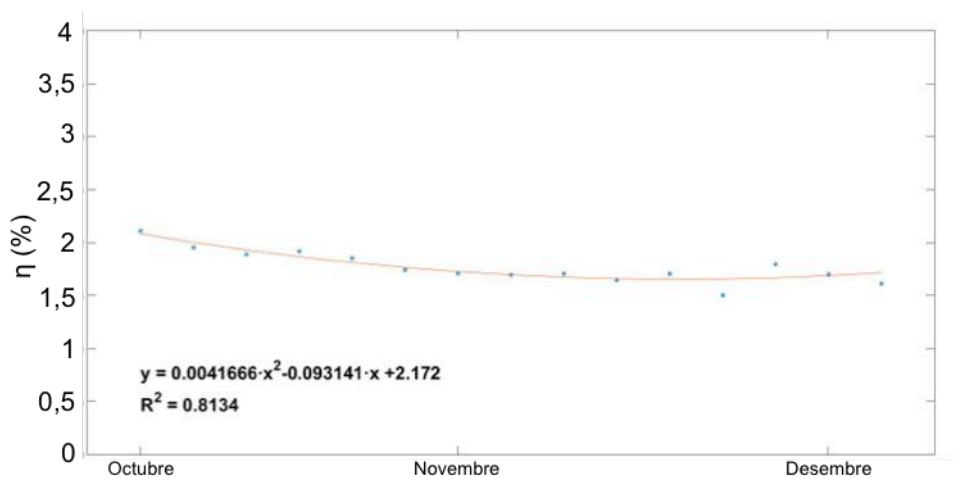
TEC.		T (°C)		Glob (W/ m <sup>2</sup> )	J <sub>sc</sub> (mA/m <sup>2</sup> )		V <sub>oc</sub> (V)		FF (%)		η (%)		Variació η (%)
		i	f		i	f	i	f	i	f	i	f	
A	A1	51,23	30,67	535	0,13	0,12	12,11	11,83	46,37	46,04	1,33	1,21	-9,02
	A2	51,66	43,80	623	0,14	0,13	11,40	10,86	39,36	39,31	1,00	0,88	-12,00
	A3	53,65	45,88	622	0,15	0,13	11,16	11,25	40,77	38,65	1,07	0,89	-16,82
	A4	34,18	24,50	765	0,34	0,31	8,68	8,12	55,34	52,55	2,08	1,71	-17,81
	A5	34,18	35,52	767	0,33	0,30	8,68	7,95	53,15	51,04	1,94	1,61	-17,33
B	B1	39,16	28,97	562	0,43	0,37	7,67	8,00	54,38	37,53	3,18	1,77	-44,29
	B2	49,34	30,33	581	0,50	0,42	7,67	8,00	60,52	55,57	3,99	3,39	-14,91
	B3	49,79	30,27	684	0,59	0,48	7,20	8,31	59,45	55,52	3,72	3,29	-11,63
C		42,28	33,07	670	0,11	0,12	33,49	31,63	43,26	41,23	2,57	2,19	-14,79

Tal i com es pot veure a la taula anterior, la tecnologia B domina en eficiència i factor d'ompliment, amb una mitjana d'eficiències inicial i final del 3,6% i del 2,8%, respectivament, envers de la tecnologia C, inferior al 2,5% i la tecnologia A, que cau per sota del 2% per al segon lot de mòduls produïts (A4 i A5). El primer lot de mòduls A, com ja s'havia vist durant la seva caracterització, presenta unes característiques elèctriques pobres, amb eficiències al voltant de l'1%. En qualsevol cas, és clar que els valors d'eficiència assolits estan molt per sota dels corresponents als mòduls de silici cristal·lí comercials, que se situen al voltant del 17% per al monocristal·lí i del 16% per al policristal·lí [12].

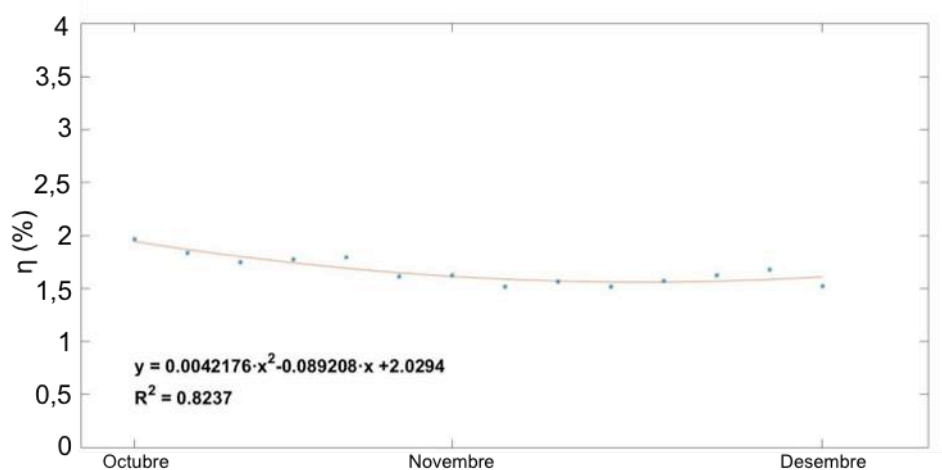
Com ja s'ha esmentat, per a aplicacions d'integració dels mòduls semitransparents en elements constructius, com façanes d'edificis, és fonamental que tinguin longevitat (com a mínim, 20 anys) i que, a més a més, es mantinguin estables en qüestió de rendiment al llarg del temps. En tots els mòduls del *benchmarking* s'ha observat degradació. Tal i com es pot veure a la taula 5.6, l'eficiència experimenta una caiguda important entre l'inici i el final del període. La degradació inicial del mòdul és una característica comuna en les tecnologies fotovoltaïques [13], però en aquest cas s'ha de tenir en compte que el període de *benchmarking* ha estat curt. Per això és important poder predir si els mòduls continuaran degradant-se molt de temps, i per tant, quedaran inservibles en qüestió de mesos, o bé si assoliran una estabilitat al voltant d'un valor concret d'eficiència.

Les següents gràfiques mostren la tendència de l'eficiència per als mòduls A4, A5, B2, B3 i C. Els mòduls del primer lot de la tecnologia A (A1, A2 i A3) no s'han considerat per les seves característiques elèctriques inferiors, mentre que el mòdul B1 ha presentat una caiguda d'eficiència de gairebé el 30% (envers la variació molt més reduïda de B2 i B3) i s'ha assumit com a defectuós. Per a les corbes de tendència s'ha triat la que millor

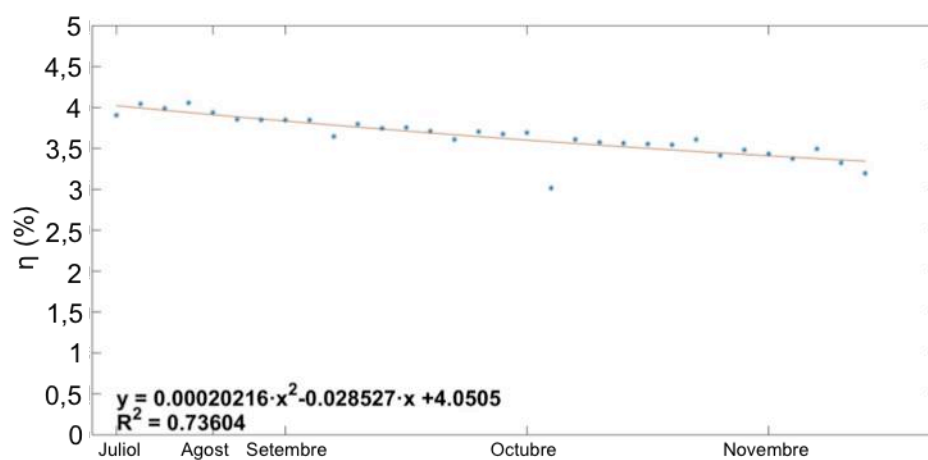
s'ajustava a l'evolució dels valors d'eficiència.



**Figura 5.23:** Corba de tendència de l'eficiència del mòdul A4.

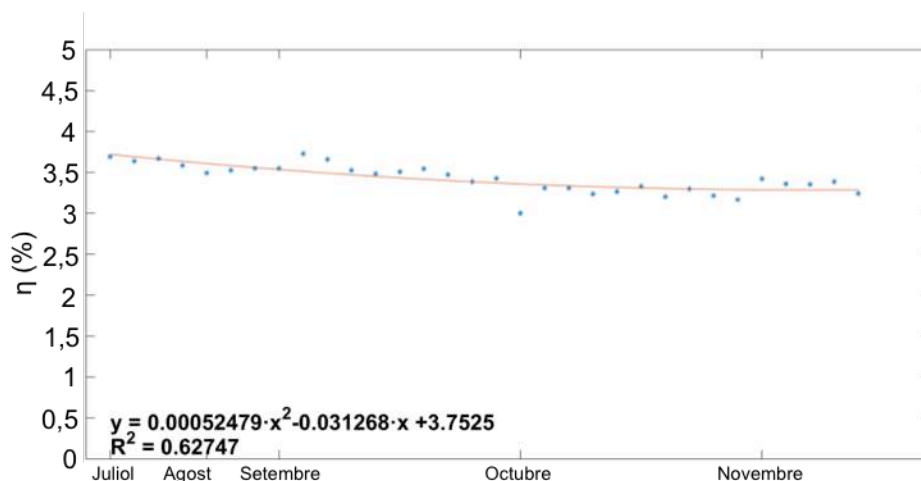


**Figura 5.24:** Corba de tendència de l'eficiència del mòdul A5.

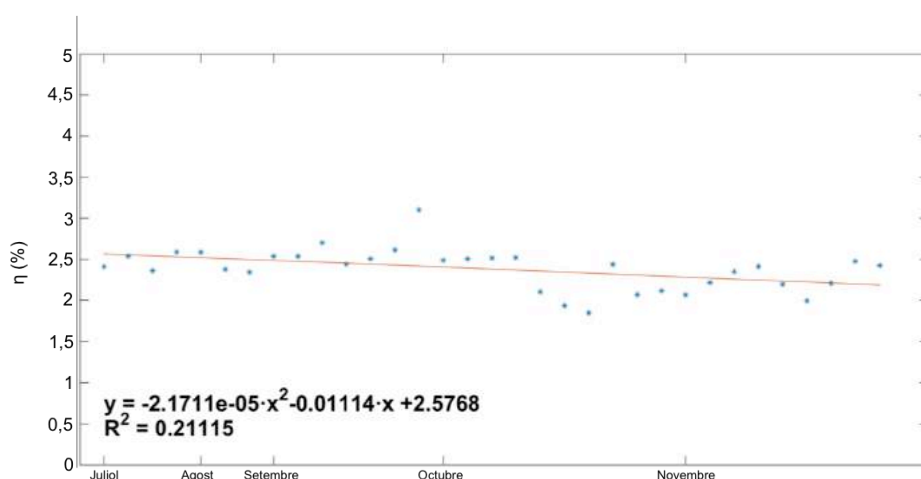


**Figura 5.25:** Corba de tendència de l'eficiència del mòdul B2.





**Figura 5.26:** Corba de tendència de l'eficiència del mòdul B3.



**Figura 5.27:** Corba de tendència de l'eficiència del mòdul C.

La tendència dels mòduls A, que s'ha ajustat millor a una corba quadràtica, exhibeix una certa estabilització en les darreres dades d'eficiència, fet que és positiu, però que s'hauria de confirmar amb la presa de més dades durant més temps. El mòdul B3 presenta un comportament similar, mentre que el B2 no mostra indicis d'estabilització. En la gràfica del mòdul C s'observa una estabilitat dels valors d'eficiència fins a principis d'octubre que es podria ajustar a una recta gairebé horitzontal, però a partir d'aquest moment pateix una caiguda brusca d'eficiència i un posterior comportament molt variable, la qual cosa fa pensar en una anomalia en la presa de mesures o en el propi mòdul.

En el cas del silici cristal·lí, en ser una tecnologia molt madura el tema de l'estabilitat està prou resolt. Normalment, les corbes de tendència de l'eficiència d'un mòdul de silici cristal·lí presenten una lleu caiguda al principi en eficiència, que ràpidament s'estabilitza [13]. Els fabricants d'aquest tipus de mòduls acostumen a garantir el manteniment de, com a mínim, el 80% de la potència inicial durant els primers 25 anys de vida, de manera que la caiguda d'eficiència hauria de ser menor del 20% en aquest període de temps. Els mòduls orgànics

de l'avaluació comparativa han mostrat caigudes properes a aquest valor en tan sols dos mesos, per tant, està clar que actualment aquests mòduls no poden competir en estabilitat amb la tecnologia reina de l'energia solar fotovoltaica.

#### 5.4. Resum dels resultats

Els mòduls de la tecnologia innovadora A, basats en una estructura invertida ITO-PET/ZnO/P3HT:PCBM/PEDOT:PSS/AgNW aplicada a partir de dissolucions en un procés *roll-to-roll*, han assolit uns valors de transparència superiors als de les altres dues tecnologies, amb valors propers al 16% pels mòduls de la segona tongada (A4 i A5). Aquest resultat és molt positiu per a la potencial producció d'aquests mòduls a una escala més gran per a la seva integració en elements constructius d'edificis com les finestres. Quant a eficiència, s'han obtingut valors lleugerament inferiors, al voltant del 2%, respecte de les tecnologies comercials. S'ha de tenir en compte, però, que aquests discrets resultats de rendiment, junt amb el bon comportament dels mòduls pel que fa a la transmissió de la llum, no suposarien una barrera per a la seva utilització en aplicacions de BIPV o fotovoltaica integrada en edificis. A més a més, en ser una tecnologia tan jove, es preveu un augment en l'eficiència de la fotovoltaica orgànica, ja que el rendiment és el principal objecte d'estudi i recerca en tecnologies emergents. El problema detectat, però, és la inestabilitat dels mòduls, que veuen reduïda la seva eficiència en poc temps, amb caigudes de fins a un 17% en un període de dos o tres mesos per als mòduls A i, tot i observar una certa tendència de l'eficiència a estabilitzar-se pels mòduls A4, A5 i B3, el problema de l'estabilitat és un dels aspectes a tenir en compte en la recerca que es durà a terme en els propers anys.

A continuació es mostra una taula amb els resultats de transparència i eficiència obtinguts per a tots els mòduls on es poden veure les característiques significatives assolides durant el període de *benchmarking*.

**Taula 5.7:** Resum dels resultats de transparència, eficiència i estabilitat assolits.

TECNOLOGIA	$\bar{\tau}_{i\ 400-800}$ (%)	$\bar{\tau}_{f\ 400-800}$ (%)	$\eta_i$ (%)	$\eta_f$ (%)	Variació $\eta$ (%)
A	17,4	18,1	1,49	1,30	-12,75
A, lot 1	19,9	19,8	1,13	0,99	-12,40
A1	18,8	18,0	1,33	1,21	-9,02
<b>A, lot 2</b>	<b>13,80</b>	<b>15,50</b>	<b>2,02</b>	<b>1,66</b>	<b>-17,41</b>
B	14,22	13,53	3,59	3,01	-23,61
<b>B2 i B3</b>	<b>14,10</b>	<b>13,55</b>	<b>3,82</b>	<b>3,40</b>	<b>-13,27</b>
<b>C</b>	<b>11,20</b>	<b>10,60</b>	<b>2,36</b>	<b>2,44</b>	<b>-14,79</b>



## 6. Anàlisi de costos

El cost d'un sistema fotovoltaic té en compte el cost dels mòduls fotovoltaics i el balanç de sistemes. El cost dels mòduls o matriu interconnectada de cèl·lules solars inclou els costos de materials, costos de fabricació (màquines utilitzades, mà d'obra, energia requerida pel procés) i costos d'assemblatge del mòdul (connexions, cables). D'altra banda, el balanç de sistemes queda determinat pel cost del sistema estructural, els costos del sistema elèctric (inversor, transformador, cablejat) per sistemes connectats a la xarxa elèctrica i els costos de bateria o sistemes d'emmagatzematge utilitzats en sistemes fora de xarxa.

L'anàlisi de costos d'aquest treball se centrarà en el cost dels mòduls de la tecnologia fotovoltaica orgànica semitransparent, referenciada a una escala productiva d'1M de m<sup>2</sup> de mòduls 1m x 1m amb una àrea activa (àrea del mòdul que contribueix a la generació de corrent) de 90% i una eficiència prevista del 5%. En cap cas s'inclourà la laminació final del mòdul amb vidre perquè en aquest cas, com que la finalitat dels mòduls és ser instal·lats en elements constructius d'edificis, es considera el vidre part del sistema estructural i, per tant, part del balanç de sistemes.

### 6.1. Cost de materials

Per als mòduls fotovoltaics orgànics es contemplen dues opcions que varien tan sols en la tria del material per a l'elèctrode inferior sobre el substrat flexible PET. Tal i com s'ha dit en l'apartat referent a l'estructura de les cèl·lules, els elèctrodes superiors configurats amb el conductor transparent ITO (mòduls ITO-plata) són els més utilitzats en la recerca tot i el seu elevat cost de material i de producció, que han fet sorgir altres alternatives més econòmiques de cara a una producció a gran escala més rendible. L'alternativa plantejada en aquest treball és fabricar l'elèctrode inferior amb nanocables de plata (AgNW), igual que el superior (mòdul plata-plata).

A continuació s'avaluen els costos de materials segons el tipus d'elèctrode superior utilitzat. El cost del material s'especifica en €/m<sup>2</sup> i els valors indicats corresponen en tots els casos a estimacions de costos per a una potencial producció a gran escala de mòduls fotovoltaics de dimensions 1m x 1m, que sempre són més baixos respecte dels costos dels mateixos materials per a producció en laboratori. Les dades han estat proporcionades pels fabricants de cada una de les capes per als mòduls d'estudi, que han tingut en compte la situació de mercat potencial esmentada per a l'estimació dels costos.

- Mòduls ITO-plata

**Taula 6.1:** Cost per metre quadrat de cada capa del mòdul ITO-plata

CAPA	MATERIAL	COST (€/m <sup>2</sup> )
<b>Substrat</b>	PET	3
<b>Cristall fotònic</b>	Cinc capes de TiO <sub>2</sub> i cinc capes de SiO <sub>2</sub>	5
<b>Barrera</b>	PET	1
<b>Adhesiu</b>	DELO-KATIOBOND	0,3
<b>Ànode</b>	AgNW	1
<b>Capa transportadora de forats</b>	PEDOT:PSS	0,5
<b>Acceptador</b>	PCBM	1,2
<b>Donador</b>	P3HT	0,7
<b>Capa transportadora d'electrons</b>	ZnO en nanopartícules	2
<b>Càtode</b>	ITO	24
<b>Substrat</b>	PET	3
		<b>42,7</b>

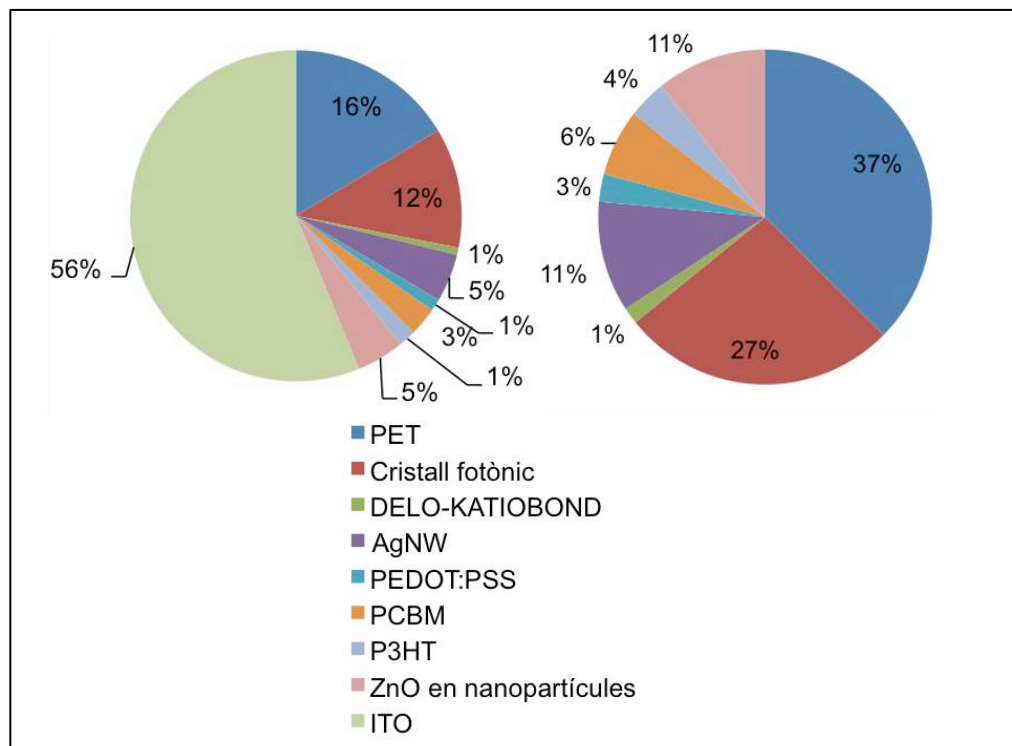
- Mòduls plata-plata

**Taula 6.2:** Cost per metre quadrat de cada capa del mòdul plata -plata

CAPA	MATERIAL	COST (€/m <sup>2</sup> )
<b>Substrat</b>	PET	3
<b>Cristall fotònic</b>	Cinc capes de TiO <sub>2</sub> i cinc capes de SiO <sub>2</sub>	5
<b>Barrera</b>	PET	1
<b>Adhesiu</b>	DELO-KATIOBOND	0,3
<b>Ànode</b>	AgNW	1
<b>Capa transportadora de forats</b>	PEDOT:PSS	0,5
<b>Acceptador</b>	PCBM	1,2
<b>Donador</b>	P3HT	0,7
<b>Capa transportadora d'electrons</b>	ZnO en nanopartícules	2
<b>Càtode</b>	AgNWs	1
<b>Substrat</b>	PET	3
		<b>18,7</b>

- Comparació de les dues propostes

Així com el cost de l'elèctrode de nanocables de plata per a una producció a gran escala és molt reduït ( $1\text{€}/\text{m}^2$ ), el preu de l'ITO es manté molt elevat ( $24\text{€}/\text{m}^2$ ) i suposa més del 50% del cost total dels materials, que, en conseqüència, es dobla respecte del mòdul plata-plata. Amb això, es pot concloure que l'alternativa emergent de l'ús de nanocables de plata per a l'elèctrode inferior dels mòduls fotovoltaics, que com s'ha esmentat en l'apartat 3.2.1 pot oferir rendiments equivalents o millors que l'ITO, és una bona opció de cara a una fabricació cost efectiva de grans volums de producte. Per als següents càlculs, es tindran en compte els costos de l'alternativa de mòdul plata-plata.



**Figura 6.1:** Gràfica de la contribució de cada material del mòdul fotovoltaic ITO-plata (esquerra) i plata-plata (dreta) al cost total dels materials.

## 6.2. Cost de la producció dels mòduls

La fabricació dels mòduls involucra, a part dels materials, els costos de maquinària, la mà d'obra per a la manipulació de les màquines i la realització de les tasques secundàries (encapsulació, connexions, manipulació del producte), els elements connectors (cables, caixa de connexions) i despeses generals (instal·lacions, energia, gestió, etc.). Novament, els costos considerats corresponen a una producció d'1 milió de  $\text{m}^2$  de mòduls  $1\text{m} \times 1\text{m}$  amb el procés de fabricació descrit a l'apartat 4.3. En aquest escenari, la inversió en maquinària ascendeix a 2.590.000 € i inclou dues màquines d'impressió (una per al mòdul i l'altra per al cristall fotònic), tres làsers de femtosegon (per a l'execució de les tres línies patró) i una

màquina de laminació per a la pre-laminació del mòdul amb el cristall fotònic. La depreciació de les màquines és de 10 anys. Quant a la mà d'obra, s'assumeix un cost per operador de 50.000 €/any. Considerant que, com a mínim, cada màquina de recobriment i làser són operades per dos i un treballador, respectivament, la laminació del mòdul amb el cristall fotònic pot ser realitzada per un altre treballador i tres treballadors addicionals poden dur a terme les tasques auxiliars, el cost total de la mà d'obra durant la fabricació dels mòduls s'estima en 450.000 €/any. Finalment, per a les connexions elèctriques, el cost és de 2 € per unitat i les despeses generals es prenen com un 25% del total del cost de fabricació [14].

La capacitat de producció de la màquina d'impressió és de 20 m/min a velocitat màxima. Si el temps operatiu de la màquina és de 800 hores anuals, una producció total d'1 milió de m<sup>2</sup> pot ser assolida per a mòduls d'un metre d'ample. Amb l'objectiu d'eficiència del 5% per mòdul i un 90% d'àrea activa, i unes condicions d'irradiació típiques de 1000 W/m<sup>2</sup>, es pot calcular la capacitat total dels mòduls de la següent manera:

$$Capacitat\ anual = 1000 \frac{W}{m^2} \cdot 0,05 \cdot 0,9 \cdot 1.000.000\ m^2 = 45 \frac{MW}{any}$$

Si es considera un mercat potencial de 100 a 250 MW/any per a la comunitat europea [15], aquesta xifra podria satisfer les necessitats del mercat en un 18-25%.

La següent taula resumeix tots els costos que formen part del cost total de fabricació dels mòduls en el cas descrit anteriorment. Els costos en €/W<sub>p</sub> s'han calculat a partir dels valors estimats de capacitat energètica anual.

**Taula 6.3:** Desglossament de costos per a la producció dels mòduls fotovoltaics orgànics semitransparents.

		Quantitat	Cost per unitat (€/m <sup>2</sup> )	Cost d'inversió (€/any)	Cost total (€/m <sup>2</sup> )	Cost total (€/any)	Cost total (€/W <sub>p</sub> )
<b>Materials</b>		-	-	-	18,7	16.830.000	0,374
<b>Depreciació dels béns de maquinària</b>	Màquina d'impressió per als mòduls	1	600.000	600.000	0,06	60.000	0,001
	Màquina d'impressió per al cristall fotònic	1	480.000	480.000	0,05	48.000	0,001
	Làser de femtosegon	3	500.000	1.500.000	0,15	150.000	0,003
	Pre-laminació	1	10.000	10.000	0	1.000	0,000
<b>Mà d'obra</b>	Operador	9	-	-	0,45	450.000	0,010
<b>Despeses generals</b>		-	-	-	0,18	177.250	0,004
<b>Connexions elèctriques</b>	Caixa de connexions amb cable	1.000.000	2	-	2	2.000.000	0,044
				<b>2.590.000</b>	<b>21,59</b>	<b>19.716.250</b>	<b>0,44</b>

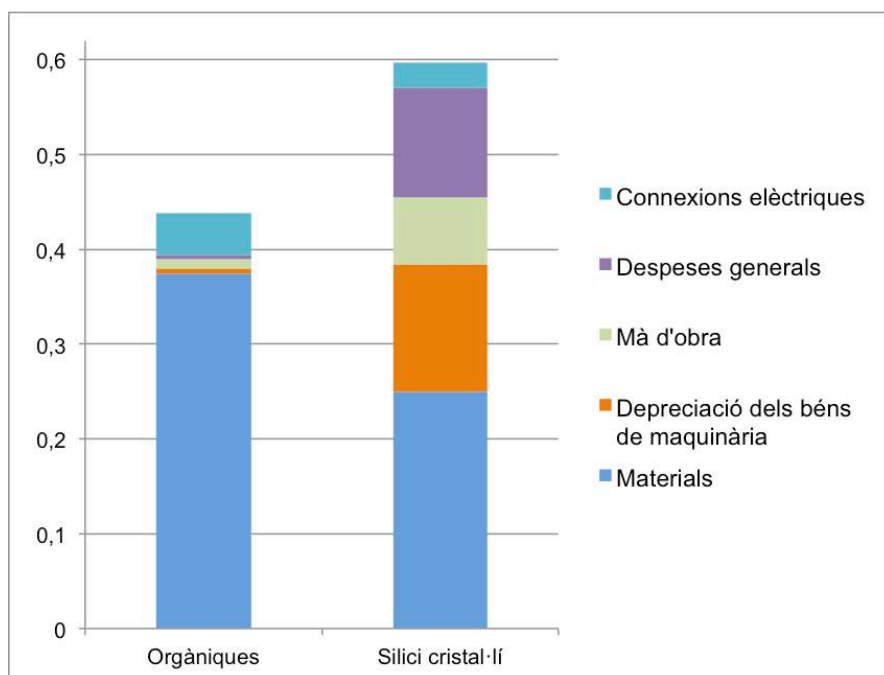
Els costos referents al silici cristal·lí s'han obtingut d'un article científic [16], el qual desglossa els costos anuals per  $W_p$  de les fases de fabricació del *wafer*, cèl·lula i mòdul, incloent els costos de materials, processament del material, depreciació dels béns de maquinària, mà d'obra, caixa de connexions i cables i altres despeses generals (electricitat, manteniment, pèrdua de rendiment). A l'estudi també s'avaluen els costos del marc, el vidre del laminat final i l'empaquetament, que s'han eliminat per a ajustar-se a l'abast d'aquest treball. Els costos estan expressats en dòlars americans i per convertir-los a euros s'ha aplicat una taxa de canvi corresponent a l'any de publicació (1 dòlar = 0,76 euros). L'article presenta els costos en tres situacions, (i) les dades reals del 2012, (ii) els valors previstos per al 2020 i (iii) els valors previstos per al 2020 amb un concepte avançat de plaques fotovoltaïques. Els valors finalment utilitzats per a la comparativa han estat els del segon cas. La següent taula indica el desglossament dels costos en €/W<sub>p</sub>.

**Taula 6.4:** Desglossament de costos per a la producció dels mòduls fotovoltaics de silici cristal·lí.

		Cost total (€/W <sub>p</sub> )
<b>Processament de materials</b>	Matèria primera (silici)	0,051
	Modelatge del lingot	0,017
	Tallat per serra de fil de diamant	0,037
	Pasta metàl·lica	0,036
	Substàncies químiques	0,030
	Pantalla	0,008
	Làmina posterior	0,029
	Encapsulant	0,023
	Cinta elèctrica	0,019
	<b>Depreciació dels béns de maquinària</b>	0,135
<b>Mà d'obra</b>		0,071
<b>Despeses generals</b>	Manteniment	0,116
	Electricitat	
	Pèrdua de rendiment	
<b>Connexions elèctriques</b>	Caixa de connexions amb cable	0,027
		<b>0,6</b>

En la següent gràfica s'aprecien quines són les fases més costoses en la producció dels mòduls fotovoltaics orgànics i cristal·lins. És destacable com, en els mòduls orgànics, gairebé tot el cost depèn dels materials i el seu processament, mentre que en el cas dels mòduls de silici cristal·lí els costos es reparteixen una mica més, degut a les elevades despeses d'energia elèctrica durant el procés de fabricació i l'ús de diverses màquines de preu elevat, com ara els forns.





**Figura 6.2:** Desglossament de les contribucions de cada fase de la producció dels mòduls fotovoltaics orgànics semitransparents i dels de silici cristal·lí.

Els costos del silici cristal·lí s'han contrastat amb dades recents per validar el càlcul desenvolupat a la taula anterior. El preu per  $W_p$  d'un sistema fotovoltaic (mòduls i balanç de sistemes) es quantifica en 1,27 €/W<sub>p</sub> al 2015 [17]. Un 48% d'aquest s'atribueix al cost dels mòduls, el qual se situa en 0,61 €/W<sub>p</sub>, que és gairebé el mateix valor que el mostrat en la taula 6.4.

## 7. Temps de retorn energètic i emissions de gasos d'efecte hivernacle

Per a establir una comparativa més enllà de l'econòmica per a les dues tecnologies fotovoltaïques considerades durant el treball (silici cristal·lí i orgànica) s'utilitzen indicadors quantitatius que permeten una avaluació uniforme. En aquest treball, s'utilitzaran els indicadors de temps de retorn energètic (EPBT) i les emissions de gasos d'efecte hivernacle. El càlcul d'aquests indicadors ha estat facilitat per la col·laboració en el projecte en què s'han desenvolupat els mòduls fotovoltaics orgànics semitransparents d'una empresa especialitzada en l'elaboració d'anàlisis de cicle de vida.

L'anàlisi de cicle de vida és una eina per avaluar el potencial impacte mediambiental i l'eficiència global d'un producte o sistema al llarg de totes les fases del seu cicle de vida (extracció de matèries primeres, fabricació, transport, us, eliminació i reciclatge, etc.). L'estudi consisteix en quatre fases, que són la definició de l'objectiu i l'abast, l'anàlisi de l'inventari, l'estudi de l'impacte i la interpretació dels resultats. L'elaboració de l'anàlisi és un procés iteratiu i, per tant, cada una de les fases és revisitada i recalculada fins a obtenir els resultats proposats.

En aquest treball, l'abast del càlcul dels paràmetres inclou tan sols els materials i el procés de fabricació dels mòduls fotovoltaics, ja que la tecnologia orgànica analitzada encara no ha estat implementada al nivell que proposa el treball i, per tant, no es disposa de les dades suficients com per considerar les fases posteriors. Dins de la fabricació dels mòduls tampoc s'inclourà la laminació amb el vidre perquè, en considerar els mòduls per a aplicacions d'integració en els elements constructius d'edificis (BIPV), aquest pas és assumit com a part del balanç del sistema i, consegüentment, queda fora de l'abast del treball. Així doncs, es tindrà en compte per als mòduls fotovoltaics orgànics l'inventari de materials (incloent dissolvents i productes no presents en el mòdul final), l'energia inclosa en el processament dels materials a partir de la matèria primera i l'energia corresponent al procés de fabricació. Similarment a l'anàlisi de costos, per a establir una comparació coherent entre les dues tecnologies, es consideraran únicament les contribucions de les fases esmentades anteriorment en el càlcul dels indicadors dels mòduls de silici cristal·lí. Això és, des de la producció de silici metal·lúrgic (Mg-Si) a partir de la matèria primera i posterior producció de silici de grau solar (SoG) fins a la fabricació dels mòduls.

A continuació es parla dels càlculs del temps de retorn energètic (EPBT) i de les emissions de gasos d'efecte hivernacle per als mòduls fotovoltaics orgànics semitransparents de què es parla en el treball. En aquests càlculs es presenten els valors d'energia primària utilitzada (taula 7.1) i els kg de CO<sub>2</sub> equivalents emesos (taula 7.2) durant la part del cicle de vida dels

mòduls especificada anteriorment. Aquests valors han estat aportats per l'empresa esmentada, que els ha pogut obtenir mitjançant un software específic per a anàlisis de cicle de vida a partir de les dades d'inventari del sistema. Aquestes dades inclouen, per a cada part del procés descrit a l'apartat 4.3. d'aquest treball, els materials utilitzats i les energies requerides durant cada pas. Les dades d'inventari també especifiquen les substàncies i energia necessària per a la producció dels polímers P3HT i PCBM de la capa activa i el PEDOT:PSS de la capa transportadora de forats. Les taules amb les dades d'inventari es troben a l'annex A del treball (taules A.1-A.4). Finalment, s'ha considerat un temps de vida dels mòduls de 15 anys, que és baix en comparació a altres tecnologies fotovoltaïques (normalment de 20 a 30 anys), però més realista quant a fotovoltaica orgànica.

### 7.1. Temps de retorn energètic (EPBT)

L'indicador del temps de retorn energètic o *Energy Payback Time* (EPBT) es defineix com el període requerit perquè el sistema d'energia renovable generi la mateixa quantitat d'energia utilitzada per a produir el mateix. En les tecnologies energètiques renovables és especialment desitjable una ràpida regeneració per part del sistema de la quantitat d'energia consumida durant les fases de construcció i posada en marxa. La fórmula per calcular el temps de retorn energètic és la següent:

$$EPBT = \frac{E_{materials} + E_{fabricació} + E_{transport} + E_{instal·lació} + E_{fi\ de\ vida}}{\frac{E_{anual\ generada}}{\eta G} - E_{anual\ operació\ i\ manteniment}} \quad (Eq. 7.1)$$

on els termes del numerador són la demanda energètica primària per produir els materials del sistema fotovoltaic, fabricar els mòduls, transportar els materials durant tot el cicle de vida, instal·lar el sistema i gestionar el sistema al final de la seva vida útil ( $E_{fi\ de\ vida}$ ). El terme  $\eta G$  correspon a l'eficiència mitjana de conversió d'energia primària a electricitat en el lloc de demanda i, per tant, depèn de la localització. La demanda energètica anual per a la operació i manteniment del sistema ( $E_{anual\ operació\ i\ manteniment}$ ) es calcula en termes d'energia primària.

Tanmateix, com ja s'ha especificat en l'abast del treball, el càlcul de l'indicador EPBT només tindrà en compte l'energia consumida durant les fases de producció de materials i fabricació dels mòduls. L'energia requerida pel balanç de sistemes tampoc serà considerada per mantenir coherència respecte de l'anàlisi de costos presentat anteriorment. Conseqüentment, la fórmula simplificada del temps de retorn energètic és la següent:

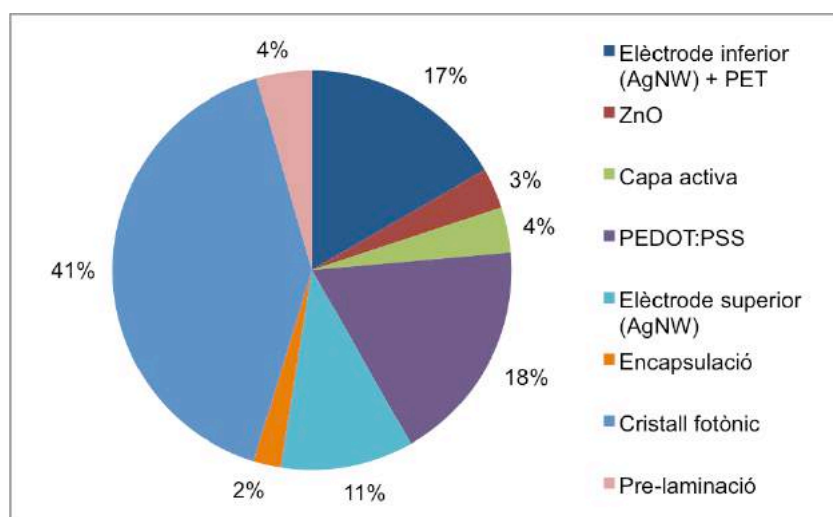
$$EPBT = \frac{E_{materials} + E_{fabricació}}{E_{anual\ generada}} \quad (Eq. 7.2)$$

Per als mòduls fotovoltaics orgànics semitransparents fabricats, la demanda d'energia

primària per a cada part del procés de fabricació, tenint en compte el processament dels materials de cada capa (preparació de tintes, tractaments), el recobriment i l'assecat, s'explicita en la taula següent.

**Taula 7.1:** Resum dels requeriments d'energia primària per a cada pas del procés.

PAS DEL PROCÉS	Energia primària (kWh/m <sup>2</sup> )
Elèctrode inferior (AgNW) + PET	11,83
ZnO	2,33
Capa activa	2,62
PEDOT:PSS	12,92
Elèctrode superior (AgNW)	7,66
Encapsulació	1,58
Cristall fotònic	28,99
Pre-laminació	3,19
	<b>71,12</b>



**Figura 7.1:** Contribució de cada part del procés productiu dels mòduls fotovoltaics orgànics semitransparents al total de demanda d'energia primària.

Tal i com es pot observar, el pas del cristall fotònic és el de més alt consum energètic. Això és atribuïble al fet que per a la seva producció s'han d'aplicar 10 capes en total i, per tant, la fabricació inclou 10 processos de recobriment amb *slot die* i 10 processos d'assecat.

Per calcular l'energia anual generada pel mòdul, s'assumeix un nivell d'irradiació de 1700 kWh/(m<sup>2</sup>·any)<sup>5</sup>, que és un valor representatiu corresponent al centre-sud d'Europa, una

<sup>5</sup> Nivell d'irradiació corresponent al centre-sud d'europa i representatiu de la mitjana mundial, obtingut amb el producte de la irradiació solar estàndard (1000 W/m<sup>2</sup> o 1kW/m<sup>2</sup>) i les hores de sol efectives anuals (en aquest cas, 1700 h).

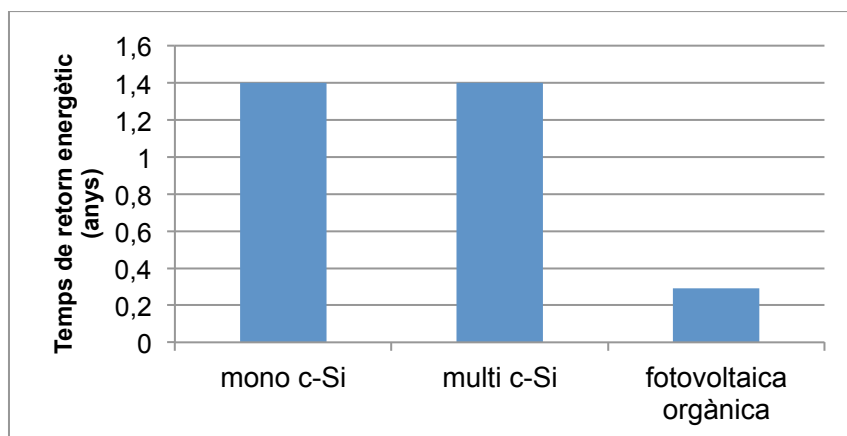
eficiència prevista del 5% (eficiència ja obtinguda per a les cèl·lules fotovoltaïques d'aquestes característiques i previsiblement assolible pels mòduls) i una àrea activa del 90%, de tal manera que:

$$E_{\text{anual generada}} = 1700 \cdot 0.05 \cdot 0.9 = 76,5 \text{ kWh/m}^2 \quad (\text{Eq. 7.3})$$

Prenent el valor total de la demanda d'energia primària observada en la taula 7.1 (71,12 kWh/(m<sup>2</sup>·any)) i considerant 0,31 com a eficiència de la xarxa (valor corresponent a Europa occidental) el càlcul del temps de retorn energètic o EPBT segons l'equació 7.2 és el següent:

$$EPBT = \frac{71,12}{\frac{76,5}{0,31}} = 0,29 \text{ anys (3 mesos i mig)}$$

Respecte del temps de retorn energètic dels mòduls de silici cristal·lí, les dades han estat obtingudes d'un estudi del cicle de vida de diverses tecnologies fotovoltaïques (Fthenakis et al., 2011 [18]). Un valor d'1,4 anys aproximadament és el calculat per a les dues alternatives de silici cristal·lí, tenint en compte únicament el cicle de vida dels mòduls fins al seu assemblatge.



**Figura 7.2:** Gràfica comparativa del temps de retorn energètic de les tres tecnologies fotovoltaïques.

Aquesta comparació ha resultat adient perquè les condicions d'irradiació utilitzades en el càlcul del temps de retorn energètic són les mateixes (1700 kWh/(m<sup>2</sup>·any)). No obstant això, aquest indicador presenta una gran variabilitat depenent de la localització del sistema analitzat, sent normalment menys favorable en llocs del planeta que disposen de menys hores efectives de sol a l'any com, per exemple, el centre i nord d'Europa, ja que la producció anual d'energia, calculada tal i com es mostra en l'equació 7.3, acostuma a ser menor.

## 7.2. Emissions de gasos d'efecte hivernacle

Els sistemes fotovoltaics no generen gasos d'efecte hivernacle durant la fase de producció d'electricitat però, si es considera el cicle de vida sencer, s'han de tenir en compte les emissions de contaminant durant les etapes de fabricació, desmantellament i reciclatge. En aquest treball, només s'ha considerat la fase de fabricació dels mòduls.

Les emissions de gasos d'efecte hivernacle durant les etapes del cicle de vida d'un sistema fotovoltaic s'estimen com un equivalent de CO<sub>2</sub>, utilitzant un horitzó temporal integrat de 100 anys (CO<sub>2</sub> equivalent). Les emissions principals incloses com a emissions de gasos d'efecte hivernacle són el propi diòxid de carboni, el metà (CH<sub>4</sub>), l'òxid de nitrogen (N<sub>2</sub>O) i els clorofluorocarburs. En aquest àmbit, és important conèixer el concepte de potencial d'escalfament global o GWP (*Global Warming Potential*), que és una mesura de quanta energia absorbeixen les emissions d'una tona de gas, en relació amb el CO<sub>2</sub>, durant un període de temps concret. Per al CO<sub>2</sub>, aquest valor és 1, ja que és el gas utilitzat com a referència. El CO<sub>2</sub> es queda a l'atmosfera durant un temps molt llarg i les seves emissions causen concentracions atmosfèriques de CO<sub>2</sub> que duraran milers d'anys. El metà té un potencial d'escalfament global equivalent del voltant de 25, ja que és un gas que, tot i no romandre en l'atmosfera durant tant temps com el CO<sub>2</sub>, absorbeix molta més energia. Per altra banda, l'òxid de nitrogen té un valor de fins a 298 vegades el del CO<sub>2</sub>. Finalment, els clorofluorocarburs són els que presenten un potencial d'escalfament global més alt (de 4750 a 14.400) i, per això, s'acostumen a denominar gasos de GWP elevat [19].

L'impacte calculat de les emissions de gasos d'efecte hivernacle durant la fabricació del mòdul s'expressa en kg CO<sub>2</sub> eq per metre quadrat de mòdul. Els resultats per a cada etapa del procés de fabricació s'indiquen a la taula següent.

**Taula 7.2:** Resum de les emissions de gasos d'efecte hivernacle (GHG) per a cada pas del procés.

PAS DEL PROCÉS	Emissions de GHG (kg CO <sub>2</sub> eq/m <sup>2</sup> )
Elèctrode inferior (AgNW) + PET	2,19
ZnO	0,46
Capa activa	0,54
PEDOT:PSS	2,57
Elèctrode superior (AgNW)	1,62
Encapsulació	0,21
Cristall fotònic	5,93
Pre-laminació	0,59
	<b>14,11</b>

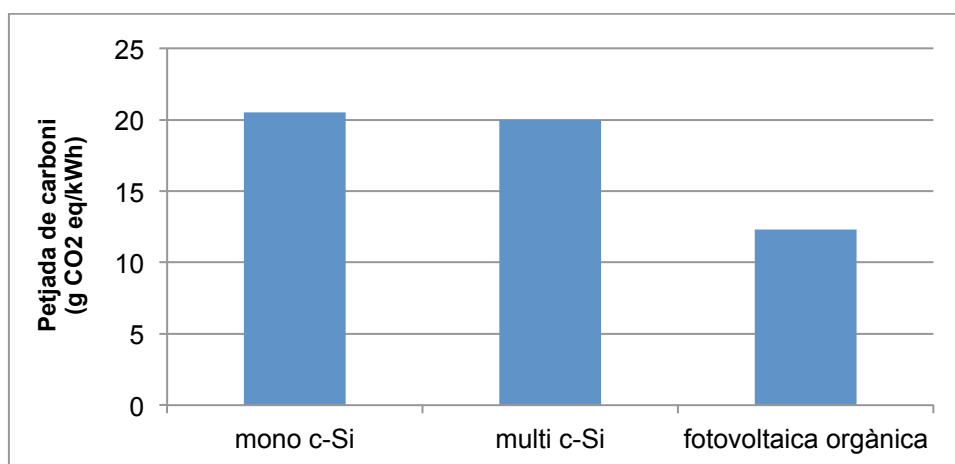
Per a la comparació de nivells d'emissió de gasos d'efecte hivernacle, normalment s'utilitza l'impacte dividit per la producció total d'energia [g CO<sub>2</sub> eq/kWh]. Per passar els 14,11 kg CO<sub>2</sub> eq/m<sup>2</sup> a aquestes unitats, es calcula l'electricitat produïda per metre quadrat durant tota la vida del mòdul, que com ja s'ha dit es determina en 15 anys. El càlcul es fa simillarment a l'equació 7.3:

$$E_{\text{anual generada}} = 1700 \cdot 0.05 \cdot 0.9 \cdot 15 = 1147,5 \text{ kWh/m}^2 \quad (\text{Eq. 7.4})$$

De tal manera que,

$$\text{Emissions de GHG} \left[ \frac{\text{g CO}_2 \text{ eq}}{\text{kWh}} \right] = \frac{14,11}{1147,6} \cdot 1000 = 12,3 \text{ g CO}_2 \frac{\text{eq}}{\text{kWh}} \quad (\text{Eq. 7.5})$$

Per a les dades de les emissions de gasos d'efecte hivernacle corresponents al silici cristal·lí s'ha tornar a recórrer a la mateixa font de la qual s'han extret els temps de retorn energètic. Els valors són gairebé 30 g CO<sub>2</sub> eq/kWh per a tot el sistema fotovoltaic (balanç de sistemes inclòs). El desglossament de les diverses fases permet identificar el valor adequat per l'abast del treball, que se situa al voltant dels 20 g CO<sub>2</sub> eq/kWh.



**Figura 7.3:** Gràfica comparativa de les emissions de diòxid de carboni de les tres tecnologies fotovoltaïques.

Convé destacar que, així com la tecnologia fotovoltaica de silici cristal·lí està prou estabilitzada en qüestió d'eficiència, s'assumeix un augment de l'eficiència de les cèl·lules i mòduls fotovoltaics orgànics en els propers anys que permetrà una major producció d'energia. Com que el paràmetre utilitzat en aquesta comparació és inversament proporcional a l'energia produïda pel sistema fotovoltaic durant tota la seva vida útil, l'augment d'eficiència comportaria una reducció del valor d'aquest paràmetre, així com també ho faria un increment en la longevitat dels mòduls.

En el potencial d'escalfament global d'un sistema fotovoltaic també influeix en gran mesura el tipus de subministrament elèctric per a satisfer les necessitats energètiques del cicle de

vida del producte (o, en aquest cas, l'etapa de producció dels mòduls), que alhora varia en funció de la localització considerada. Això fa que l'impacte ambiental relacionat amb les emissions de gasos d'efecte hivernacle tingui una gran variació segons el lloc del planeta en què es produeixin els mòduls. Així, en zones amb una major contribució de renovables en el mix elèctric s'obtidran valors d'emissions més petits que en territoris molt dependents de combustibles fòssils per a la producció d'electricitat (com la Xina) [20]. Aquesta variabilitat afecta en major grau a les tecnologies de silici cristal·lí, que tenen etapes de major consum energètic.





## 8. Pressupost

En primer lloc, es consideren les hores treballades per l'estudiant. Si es té en compte que el projecte són 12 crèdits ECTS i que cada crèdit equival a 28 hores de treball, això resulta en un total de 336 hores treballades. S'assumeix un sou estàndard d'un graduat en enginyeria de perfil junior, que s'aproxima als 20€/h. Per tant, el cost de treball de l'estudiant és de 6.720€.

En segon lloc, s'han de sumar els costos indirectes (suport tecnològic, llum, Internet, telèfon...) que s'estimen en un 25% dels costos directes corresponents al sou de l'estudiant, per a un total de 1.680€ en material i recursos tecnològics.

Com que els mòduls fabricats per a l'avaluació comparativa s'havien produït abans del començament del projecte, no se'n consideren els costos.

Similarment, per a l'avaluació comparativa s'han utilitzat els següents dispositius de mesura dels quals l'entitat subcontractada ja disposava prèviament al projecte (piranòmetre, termoparell de tipus T, sistema d'adquisició de dades i traçador I-V). Per tant, els costos de material considerats són únicament els corresponents a la fabricació i instal·lació dels seguidors del punt de màxima potència (MPPT) especials per als mòduls avaluats, que es quantifiquen en 730€. El cost de les hores de personal per a l'anàlisi i extracció de dades del *benchmarking* ha estat de 2.600€ en hores de laboratori i 8.300€ en hores a l'aire lliure per a un total de 10.900€.

La suma dels costos anteriors resulta en 20.030€.

A continuació, es mostra una taula amb el resum de despeses.

**Taula 8.1:** Relació de costos del projecte

Concepte del cost	Cost (€)
<b>Hores estudiant</b>	6.720
<b>Costos indirectes</b>	1.680
<b>MPPT</b>	730
<b>Personal <i>benchmarking</i> (hores laboratori)</b>	2.600
<b>Personal <i>benchmarking</i> (hores aire lliure)</b>	8.300
<b>TOTAL</b>	20.030



## 9. Impacte ambiental

L'impacte ambiental del projecte vinculat a la labor realitzada per l'estudiant és mínim, ja que tan sols hi contribueix l'energia consumida durant les hores de treball (llum, electricitat) i l'ús de paper i tinta de la impressora.

D'altra banda, si es té en compte la labor realitzada per l'equip de treball de Lleida, que s'ha encarregat de monitoritzar i realitzar les mesures de l'avaluació comparativa es poden considerar els següents factors:

- Energia per alimentar els equips de mesura (piranòmetre, sistema d'adquisició de dades, MPPT, traçador I-V).
- Energia consumida al laboratori durant les hores de presa de mesures de transmitància espectral.
- Instal·lació i manteniment de la unitat de mesura a l'aire lliure. En tractar-se aquesta d'una caseta de fusta, posteriorment al final de l'avaluació comparativa es desmantellarà i l'àrea ocupada quedarà inalterada.

En qualsevol cas, l'impacte ambiental d'aquest projecte és molt reduït. Cal destacar que en aquest impacte no s'ha considerat el procés de fabricació dels mòduls avaluats, el qual si que hi contribuiria més degut a la major quantitat d'energia empleada i les substàncies químiques utilitzades per a cada capa del mòdul.



## Conclusions

Amb la realització d'aquest treball s'ha pogut analitzar l'estat de l'art de les tecnologies fotovoltaïques orgàniques semitransparents existents i emergents quant a materials, processament i característiques de transparència i eficiència. Alhora, mitjançant l'estudi de l'estructura de les cèl·lules i dels possibles materials que la poden conformar i del procés productiu aplicable, s'ha descrit un prototip de mòdul compatible amb una futura producció a gran escala per a la seva integració en façanes d'edificis, amb la finalitat d'aconseguir un màxim aprofitament de l'àrea disponible per generar energia renovable. A partir d'aquest prototip s'han obtingut uns valors de costos, temps de retorn energètic i emissions de gasos d'efecte hivernacle que han demostrat la viabilitat d'aquests mòduls des del punt de vista econòmic i mediambiental.

També s'ha pogut comprovar que el principal problema de la fotovoltaica orgànica és la ràpida degradació dels materials que la conformen, fet que s'ha pogut observar en l'avaluació comparativa, en què totes les tecnologies analitzades han patit una forta caiguda de la seva eficiència en el curt període durant el qual s'han pres dades. Tot i que s'ha detectat una certa tendència dels valors d'eficiència a estabilitzar-se per a algun dels mòduls (en concret, A4, A5 i B3), és clar que s'ha d'assolir una millor estabilitat per a la integració dels mòduls en façanes i altres elements constructius. Per això, noves línies de recerca s'han de dur a terme quant als materials i el procés de fabricació dels mòduls que permetin als mòduls oferir un bon rendiment sostingut al llarg del temps.

D'altra banda, les conclusions resultants de la comparació de la tecnologia d'estudi amb la fotovoltaica més convencional de silici cristal·lí han estat les següents:

- S'ha observat una gran diferència entre els mètodes de fabricació de les dues tecnologies fotovoltaïques. En el cas dels mòduls de silici cristal·lí, el seu procés productiu consta de més fases que el de les tecnologies de pel·lícula fina com la orgànica i requereix una gran quantitat d'energia per poder treballar a temperatures de fins a 1400°C. Altrament, el mètode continu de producció dels mòduls fotovoltaics orgànics permet eliminar els possibles problemes que pot generar la manipulació del producte entre les diverses fases.
- El cost de producció dels mòduls fotovoltaics se situa en 0,44 €/W<sub>p</sub> en una escala productiva de gran volum per als orgànics i 0,6 €/W<sub>p</sub> per als de silici cristal·lí. En tot el procés, l'extracció i processament dels materials són les fases que més contribueixen al cost final, tot i que, proporcionalment, és molt més evident en els mòduls orgànics. Els de silici, per altra banda, tenen els costos més repartits, degut al procés de fabricació més car.

- Els paràmetres de temps de retorn energètic i, sobretot, rati d'emissions de CO<sub>2</sub> dels mòduls fotovoltaics orgànics semitransparents són millors que els de la fotovoltaica de silici cristal·lí, fet que evidencia la seva rendibilitat i el seu caràcter més respectuós amb el medi ambient.

Amb tot això, es conclou que l'estat de l'art actual de la tecnologia fotovoltaica orgànica basada en capa activa de polímers semiconductors no pot fer front als requeriments de la fotovoltaica integrada en edificis ara mateix. No obstant, els bons resultats de transparència, el cost competitiu i els valors òptims dels indicadors del cicle de vida empleats evidencien el potencial d'aquests mòduls per a una futura producció a gran escala per al seu ús en aquest camp.

### Futures línies de treball

Com ja s'ha dit, la fotovoltaica orgànica és una tecnologia jove que encara es troba en fase de recerca i que, per tant, pot presentar millores significatives en els propers anys si s'hi continua apostant, tal i com ha passat amb totes les altres tecnologies fotovoltaiques que es troben actualment en el mercat. Algunes possibles línies de recerca que es poden iniciar o sobre les quals es pot profunditzar més per a un millor rendiment i una major estabilitat dels mòduls fotovoltaics orgànics són les següents:

- **Desenvolupament de nous polímers semiconductors per a la capa activa.**  
Com s'ha vist en el treball, en l'actualitat predomina la combinació de dos polímers (donador i acceptor). No obstant, l'ús de terpolímers innovadors pot significar un increment en el rang de longituds d'ona absorbibles, fet que milloraria el rendiment de la cèl·lula. La peculiaritat dels terpolímers és que són la combinació de tres unitats de monòmer (donador, acceptor i donador-acceptor). En la recerca d'aquests nous polímers s'ha de tenir molt en compte que posseeixin una bona escalabilitat per tal que l'eficiència es vegi el menys alterada possible en passar d'escala laboratori a escala real.
- **La millora en la interacció entre capes amb la introducció d'altres materials.**  
Un dels principals problemes de les estructures invertides com la d'estudi es troba a les interfícies de la capa transportadora de forats de PEDOT:PSS amb la capa activa i l'elèctrode superior, ja que la naturalesa higroscòpica i àcida del PEDOT:PSS fan que, en absorbir i retenir aigua ambient, es produeixi corrosió i degradació en les capes superiors i inferiors. Tot i que hi ha maneres de disminuir aquests efectes, alguns estudis ja han començat a substituir el PEDOT:PSS per altres materials favorables a la recol·lecció de forats no higroscòpics, per exemple, òxids metàl·lics com el MoO<sub>3</sub> i el WO<sub>3</sub>.

- **La fabricació de cèl·lules orgàniques multi-unió (doble o triple)**, que permeten una millor captació de la llum i una millor estabilitat a l'exterior per a assolir una eficiència elevada i un temps de vida més llarg. Hi ha projectes de recerca que ja estan duent a terme aquest tipus de cèl·lules, que consisteixen en l'ús de múltiples capes actives (normalment dos o tres) amb diversos amples de banda per incrementar el rang de longituds d'ona absorbibles per l'estructura de la cèl·lula. Aquestes capes estan separades entre si per les corresponents capes transportadores d'electrons i forats, com en el cas de les cèl·lules d'una sola unió analitzades en aquest treball. La recerca en l'àmbit de les cèl·lules multi-unió també se centra en la tria òptima de materials per a aconseguir una mínima degradació per contacte entre capes. Això és un aspecte molt important, ja que en haver més capes, també hi ha més interfícies. L'estimació d'eficiència de les cèl·lules de doble unió és del 15%, i de més del 17% per a les de triple unió, mentre que el temps de vida es preveu en més de 10 anys.
- **Desenvolupament de processos que combinin una fabricació d'alt rendiment, com el *roll-to-roll*, amb atmosferes controlades** per minimitzar la interacció dels materials utilitzats amb l'aire i evitar d'aquesta manera la degradació. Algunes de les tecnologies fotovoltaïques orgàniques del mercat que obtenen uns millors resultats processen els seus mòduls al buit mitjançant la deposició de partícules per evaporació, tot i que és incert si aquest procés podria suportar, de manera rendible, una producció a gran escala com la que s'ha exposat en aquest treball.





## Agraïments

La realització d'aquest treball no hauria estat possible sense la intervenció de la Merche Polo i l'Albert Cot, que em van introduir en el món de la fotovoltaica orgànica i m'han estat supervisant durant tots aquests mesos. Gràcies a ells he pogut veure com es desenvolupa un projecte europeu des de dins i he après molt sobre aquest camp de l'energia solar, tant des del punt de vista tècnic com des del punt de vista de mercat.

També voldria fer una menció a l'Óscar Aceves, tot un expert en fotovoltaica, que em va assistir molt amablement i amb gran atenció en qualsevol dubte que tenia respecte del tema.

Finalment, voldria agrair al meu tutor, Rafael Lamaison, per la seva supervisió, la seva predisposició a ajudar-me i la facilitat que he sentit en tot moment alhora de posar-me en contacte amb ell i comunicar-m'hi.



## Bibliografia

### Referències bibliogràfiques

- [1] BERKLEY, S. The Fabrication and Characterization of Organic Solar Cells. Tanembaum. Tesi de final de grau, Pomona College Physics Department, maig 2009.
- [2] GOSTEIN, M.; DUNN, L. *Light soaking effects on photovoltaic modules: Overview and literature review*. Austin (Texas, EEUU): Atonometrics, Inc, 2011.
- [3] GLUNZ, S. W.; PREU, R.; BIRO, D. Crystalline Silicon Solar Cells - State-of-the-art and future developments. *Comprehensive Renewable Energy*. Friburg (Alemanya): Elsevier, 2012, Vol. 1, capítol 1.16.
- [4] ESPINOSA et al. *OPV for mobile applications: an evaluation of roll-to-roll processed indium and silver free polymer solar cells through analysis of life cycle, cost and layer quality using inline optical and functional inspection tools*. Roskilde (Dinamarca): Technical University of Denmark, Department of Energy Conversion and Storage, 2013.
- [5] ARMIN et al. *Efficient, Large Area, and Thick Junction Polymer Solar Cells with Balanced Mobilities and Low Defect Densities*. Brisbane (Austràlia): University of Queensland, 2014.
- [6] BURGUÉS-CEBALLOS et al. *Towards industrialization of polymer solar cells: material processing for upscaling*. Mataró: CETEMMSA Technological Centre, 2014.
- [7] LATTANTE, S. *Electron and Hole Transport Layers. Their Use in Inverted Bulk Heterojunction Polymer Solar Cells*. Lecce (Itàlia): Università del Salento, Dipartimento di Matematica e Fisica "Ennio de Giorgi", 2014.
- [8] MACHUI et al. *Cost analysis of roll-to-roll fabricated ITO free single and tandem organic solar modules based on data from manufacture*. Nürnberg (Alemanya): Friedrich-Alexander-University of Erlangen-Nuremberg, 2014.
- [9] BETANCUR, R. et al. *Transparent polymer solar cells employing a layered light-trapping architecture*. Castelldefels (Espanya): Institut de Ciències Fotòniques, 2013.
- [10] KREBS, F. *Fabrication and processing of polymer solar cells: A review of printing and coating techniques*. Roskilde (Dinamarca): Technical University of Denmark, 2008.

- [11] ABLAYEV et al. *Semitransparent solar modules based on amorphous and microcrystalline silicon*. Sant Petersburg (Rússia): 2014.
- [12] FRAUNHOFER INSTITUTE FOR SOLAR SYSTEMS. *Photovoltaics Report*. Friburg (Alemanya): Novembre 2016.
- [13] LINDROOS J.; SAVIN, H. *Review of light-induced degradation in crystalline silicon solar cells*. Espoo (Finlàndia): Aalto University, Departament de Micro i Nanociències, 2015.
- [14] AZZOPARDI et al. *Economic assessment of solar electricity production from organic-based photovoltaic modules in a domestic environment*. Manchester: Electrical Energy and Power Systems Group, School of Electrical and Electronic Engineering, University of Manchester, 2011.
- [15] PIKE RESEARCH. *BIPV and BAPV: Market Drivers and Challenges, Technology Issues, Competitive Landscape, and Global Market Forecasts*. 2012.
- [16] BUONASSISI et al. *Crystalline silicon photovoltaics: A cost analysis framework for determining technology pathways to reach baseload electricity costs*. Energy & Environmental Science. Febrer 2012, Vol. 6, p. 5874-5883.
- [17] GERMAN SOLAR INDUSTRY ASSOCIATION (BSW-Solar). 2015.
- [18] FTHENAKIS et al. *Life Cycle Inventories and Life Cycle Assessment of Photovoltaic Systems*. 2011. International Energy Agency (IEA) PVPS Task 12, Report T12-02:2011.
- [19] FORSTER et al. *Changes in Atmospheric Constituents and in Radiative Forcing*, in Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, S. Solomon, et al., Editors. 2007, Cambridge University Press: Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- [20] BEKKELUND, K. *A Comparative Life Cycle Assessment of PV Solar Systems*. Trondheim (Noruega): Norwegian University of Science and Technology, 2013.

### Bibliografia complementària

ESPINOSA et al. *A life cycle analysis of polymer solar cell modules prepared using roll-to-roll methods under ambient conditions*. Cartagena: Universidad Politécnica de Cartagena, 2010.

GARCÍA-VALVERDE et al. Life cycle analysis of organic photovoltaic technologies. *Progress in Photovoltaics*. Novembre 2010, Vol. 18(7), p. 535-558.

GUO et al. *Nanowire Interconnects for Printed Large-Area Semitransparent Organic Photovoltaic Modules*. Erlangen: Friedrich-Alexander-University of Erlangen-Nuremberg, 2015.

HOTH et al. Solution-Processed Organic Photovoltaics. *Applications of Organic and Printed Electronics, Integrated Circuits and Systems*. E. Cantatore (ed.), 2013.

JACOBY, M. The future of low-cost solar cells. *Chemical & Engineering News*. Maig 2016, Vol. 94(18), p. 30-35.

KIPPELEN, B.; BRÉDAS, J. L. *Organic Photovoltaics*. Atlanta: 2009.

KREBS et al. Freely available OPV - A fast way to progress. *Energy Technology*. Juliol 2013, Vol. 1(7), p. 378-381.

LECCISI et al. *The Energy and Environmental Performance of Ground-Mounted Photovoltaic Systems—A Timely Update*. Nàpols: Università degli Studi di Napoli "Parthenope", Departament de Ciència i Tecnologia, 2016.

LEWIS, N. S. Towards Cost-Effective Solar Energy Use. *Science Magazine*. Febrer 2007, Vol. 315, p. 798-801.

MACHUI et al. *Highly efficient, large area, roll coated flexible and rigid OPV modules with geometric fill factors up to 98.5% processed with commercially available materials*. Nürnberg: Friedrich-Alexander-University of Erlangen-Nuremberg, 2015.

MILES, R. W.; ZOPPI, G.; FORBES, I. Inorganic Photovoltaic Cells. *Materials Today*. Novembre 2007, Vol. 10(11). ISSN: 1369 7021.

WOLDEN et al. *Photovoltaic Manufacturing: Present Status, Future Prospects and Research Needs*, ca. 2010.

Treball de Fi de Grau

## **Grau en Enginyeria en Tecnologies Industrials**

# **Cap a la producció a gran escala de mòduls fotovoltaics orgànics semitransparents per a la seva integració en façanes d'edificis**

### **ANNEX A**

**Autor:** Clara Aranda Carballo  
**Director:** Rafael Lamaison Urioste  
**Convocatòria:** Gener 2017



Escola Tècnica Superior  
d'Enginyeria Industrial de Barcelona



Taula A.1: Dades d'inventari dels materials i l'energia per a la fabricació del mòdul solar.

Pas del procés	Unitats	Mòdul	1m <sup>2</sup> de superfície	Pas del procés	Unitats	Mòdul	1m <sup>2</sup> de superfície
<b>P1 - Processament elèctrode d'ITO</b>				<b>S4 - Recobriment PEDOT:PSS i línies patró</b>			
PET/ITO substrat	cm <sup>2</sup>	3050	10000				
PET pel·lícula	cm <sup>2</sup>	39.65	130				
Tinta curable amb UV	g	1	3.28				
<b>Substància</b>				<b>Substància</b>			
CuCl <sub>2</sub>	g	0.08	0.25	Isopropanol	g	12.36	40.52
Aigua	L	0.10	0.52	PEDOT:PSS	g	9	29.51
NaOH	g	0.31	1.66				
Aigua desmineralitz.	L	0.04	0.21				
<b>Energia</b>				<b>Energia</b>			
Screen printing	Wh el	303.03	993.54	PEDOT:PSS prep.	Wh el	0.45	1.48
Curat	Wh el	75.76	248.39	PEDOT:PSS recobr.	Wh el	138.89	455.37
Aiguafort	Wh el	151.52	496.77	Assecat de capa	Wh el	666.67	2185.79
<b>P2 – Recobriment ZnO</b>				<b>P5 - Recobriment elèctrode i línies patró</b>			
<b>Substància</b>				<b>Substància</b>			
Zn(OAc) <sub>2</sub>	g	1.38	0.40	Tinta plata (PV 410) <sup>a</sup>	g	6	19.67
KOH	g	0.69	0.20				
MeOH	mL	0.01	1.66				
Acetona	mL	1.01	3.32				
Isopropanol	g	7.86	25.77				
MEA	g	0.01	0.04				
<b>Energia</b>				<b>Energia</b>			
ZnO prep. tinta	Wh el	51.80	169.82	Screen printing			
ZnO slot die	Wh el	33.33	109.29	d'elèctrode de plata	Wh el	636.67	2087.43
Assecat de capa	Wh el	100.00	327.87				
<b>P3 – Recobriment capa activa</b>				<b>P6 - Encapsulació</b>			
<b>Substància</b>				<b>Substància</b>			
P3HT	g	0.03	0.10	3 M 467 MPF	g	15.43	50.6
PCBM	g	0.02	0.08	PET (2 costats)	g	22.19	72.75
Cloro benzè	mL	2	6.56				
<b>Energia</b>				<b>Energia</b>			
P3HT prep. tinta	Wh el	2	6.56	Encapsulació per			
P3HT:PCBM recobr.	Wh el	20.83	68.31	laminació R2R	Wh el	2.04	6.68
Assecat de capa	Wh el	100.00	327.87				

<sup>a</sup> 50% en pes de nanopartícules de plata, dispersió en tripropilè glicol mono metil éter.

\*Aquesta taula inclou les dades per calcular els paràmetres d'anàlisi de cicle de vida triats per a les dues opcions presentades en el treball en relació amb els elèctrodes (ITO-plata o plata-plata). El primer pas del procés és P1 per a les cèl·lules ITO-plata i P5 per a les plata-plata (afegint PET). En aquest treball tan sols s'han tingut en compte els resultats per a la opció plata-plata.



**Taula A.2:** Dades d'inventari dels materials i l'energia per a la fabricació del mòdul solar.

Pas del procés	Unitats	1m <sup>2</sup> de superfície	Pas del procés	Unitats	1m <sup>2</sup> de superfície
<b>Fabricació del cristall fotònic</b>			<b>Pre-laminació del mòdul solar<sup>b</sup></b>		
<b>Substància</b>			<b>Substància</b>		
2-propoxi etanol <sup>a</sup>	g	146.1	PET (2 cares)	g	72.75
Aigua	g	160	adhesiu	g	50.6
TiO <sub>2</sub>	g	7.75	<b>Energia</b>		
SiO <sub>2</sub>	g	1.6	Pre-laminació	Wh el	6.68
PET <sup>b</sup>	g	72.75	<b>Laminació final*</b>		
<b>Energia</b>			Vidre (3 mm gruix) <sup>e</sup>	g	7500
Recobriments <sup>c</sup>	Wh el	1389	EVA <sup>f</sup>	g	50
Assecat <sup>d</sup>	Wh el	6667			

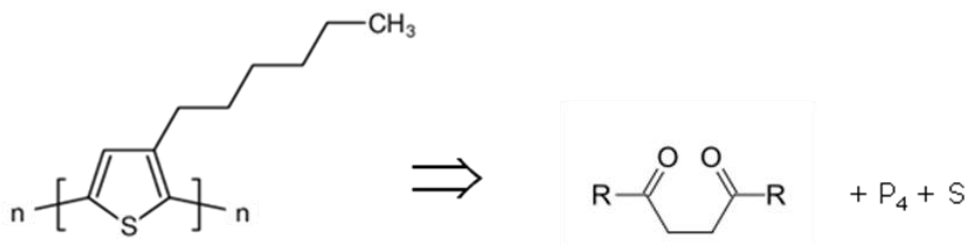
<sup>a</sup>Densitat 0.913 g/mL. <sup>b</sup>Estimació a partir de P6, procés d'encapsulació. <sup>c</sup>Estimació a partir del recobriments i assecat de la capa de PEDOT:PSS (10 cops recobriments-assecats). <sup>d</sup>Totes les capes requereixen un pas d'assecat, que és aproximadament d'un minut a 100°C. <sup>e</sup>La densitat del vidre es va considerar 2.5 g/cm<sup>3</sup>. <sup>f</sup>Estimació a partir de la quantitat d'adhesiu trobada a la literatura (Espinosa et al., 2011).

\*No considerada en el càlcul de paràmetres.

**Taula A.3:** Dades d'inventari per produir 1kg de P3HT i 1kg de PCBM.

Pas del procés	Unitats	Quantitat per 1 kg de producció	Pas del procés	Unitats	Quantitat per 1 kg de producció
<b>1) Producció P3HT</b>			<b>2) Producció PCBM</b>		
<b>Substància</b>			<b>Substància</b>		
brom	kg	8.971	Toluè	kg	122.885
tiofè	kg	7.81	oxigen	kg	73.963
hexà	kg	2.575	ciclopentà	kg	0.85
			amoni	kg	0.788
			NaClO	kg	0.344
			HCl	kg	0.218
			SO <sub>3</sub>	kg	0.479
<b>Energia</b>			<b>Energia</b>		
E tèrmica	MJ	919.68	E tèrmica	MJ	6587.3
E elèctrica	MJ	119.67	E elèctrica	MJ	799.6

1) P3HT or poli(3-hexiltiofè)

**Figura A.1:** P3HT retrosíntesi

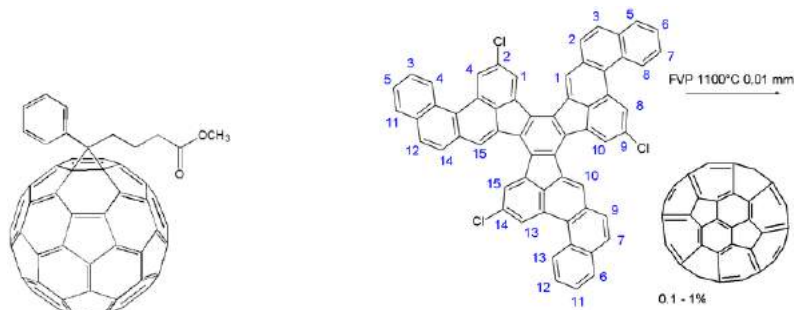
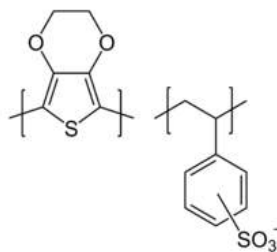
2) PCBM or fenil-C<sub>61</sub>-àcid butíric metil éster (derivat del fullerè)

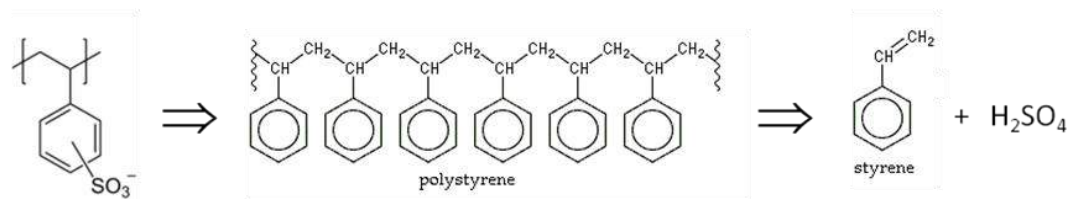
Figura A.2: Estructura i precursors del PCBM

Taula A.4: Dades d'inventari per produir 1kg de P i 1 m<sup>2</sup> d'ITO.

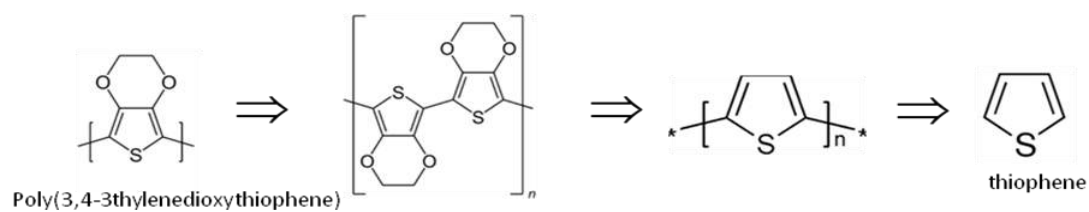
Pas del procés	Uni-tats	Quantitat per 1 kg de producció	Pas del procés	Uni-tats	Quantitat per 1 m <sup>2</sup> de producció
<b>3) Producció PEDOT:PSS</b>			<b>4) Producció ITO</b>		
<b>Substància</b>			<b>Substància</b>		
aigua	kg	0.987	indi	g	2.3
tiofè	kg	0.971	llautó	g	0.2
brom	kg	0.078	PET	g	195
poliestirè	kg	0.010	SiO <sub>2</sub>	g	0.1
			argó	g	221.79
			oxigen	g	0.0143
<b>Energia</b>			<b>Energia</b>		
E tèrmica	MJ	42.724	E tèrmica	MJ	0
E elèctrica	MJ	8.782	E elèctrica	MJ	0.08097

## 3) PEDOT:PSS o poli(3,4-etilendioxitiofè)-poli(estirè sulfonat)





Sodium polystyrene sulfonate



**Figura A.3:** Retrosíntesi del PEDOT:PSS.